

Vegetation på förorenad mark

– Hur påverkas växterna och kan deras tillstånd förbättras? Förslag utifrån mark förorenad av historisk gruv- och industriverksamhet i Falun.



Stina Jansson

Vegetation på förorenad mark – Hur påverkas växterna och kan deras tillstånd förbättras?
Förslag utifrån mark förorenad av historisk gruv- och industriverksamhet i Falun.

Vegetation on contaminated soil – How are plants affected and can their conditions be ameliorated?
Proposals from soil contaminated by the historical mining industry in Falun.

Stina Jansson

Handledare: Eva-Lou Gustafsson, SLU, Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Examinator: Frida Andreasson, SLU, Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: G2E

Kurstitel: Examensarbete i landskapsarkitektur inom landskapsingenjörsprogrammet

Kurskod: EX0793

Program/utbildning: Landskapsingenjörsprogrammet

Utgivningsort: Alnarp

Utgivningsår: 2016

Omslagsbild: Stina Jansson

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: *phytotoxicity, phytoremediation, metals, metaller, minewaste, gruvavfall, contaminated soil, förorenad mark*

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap
Institutionen för landskapsarkitektur, planering och förvaltning

Framsidas bild:

Stora stöten, Falu gruva, med utsikt över staden. Foto Stina Jansson, maj 2016.

FÖRORD

Det här självständiga arbetet är resultatet av kursen EX0793, Examensarbete i landskapsarkitektur inom landskapsingenjörsprogrammet. Kursen avslutar mina tre års studier vid SLU Alnarp, och jag återvänder till min hemort Falun.

Som boende i Falun är det svårt att inte, medvetet eller omedvetet, komma i kontakt med det gruvavfall som den historiska gruvdriften vid Falu koppargruva har lämnat. Gruvan är centralt belägen och stora delar av staden närmast gruvområdet är byggd på utfyllnadsmassor bestående av slagg. Den som vill röra sig ut från stadskärnan, åt väst eller sydväst, passerar ofrånkomligen de stora högar av avfall, som enligt utnämningen av gruvlandskapet till världsarv inte får flyttas på. I det vardagliga pratet spekuleras det ibland om och hur gruvavfallet påverkar oss människor och vår miljö. Under min praktikperiod på Falu kommun dök ämnet upp igen, utifrån ett vegetationsperspektiv.

Som landskapsingenjör är det troligt att jag någon gång under mitt yrkesliv kommer att komma i kontakt med förorenade områden, i Falun eller någon annanstans. Därför ville jag använda mitt examensarbete till att fördjupa mig i ämnet och få dels generella kunskaper, dels lära känna markförhållandena i Falun bättre.

Tack riktas till Eva-Lou Gustafsson som har handlett mig i det här arbetet. Tack också till Johannes Berglund på Miljö- och samhällsbyggnadsförvaltningen, Falu kommun, för hjälp med att spåna fram ämnet för uppsatsen, samt Hans G Johansson vid samma förvaltning, för hjälp med information och material.

Falun, 2016-06-07

Stina Jansson

SAMMANFATTNING

Falu koppargruva hade vid stängningen 1992 varit i drift i runt tusen år. Historiskt har gruvdriften och dess kringindustrier påverkat stadsklimatet i Falun negativt genom stora utsläpp av svavel och metaller. Restprodukter såsom slagg, varp och rödfärgsråvara ligger än i dag i stora stenhögar i tätorten närmast gruvområdet. Stora delar av detta gruvlandskap är sedan 2002 klassat som världsarv på grund av dess höga kulturhistoriska värde. Malmen som brutits, och som återfinns i restprodukterna, är av typen sulfidmalm, som lätt vittrar och lakar ur metaller till mark och vatten. Urlakningen gör att marken i Falun på vissa platser har ett innehåll av arsenik, bly, kadmium, koppar, kvicksilver, mangan och zink som överskrider Naturvårdsverkets generella riktvärden för förorenad mark. De ackumulerade utsläppen av svavel har under gruvans driftstid varit enorma stora, vilket är den största orsaken till markförsurningen i Falun. pH-värdet i humus är under 4 i ett stort område runt gruvan och också mineraljorden är försurad.

Syftet med det här arbetet är att ta reda på hur markförhållandena i Falun påverkar biologiska och fysiologiska processer hos vegetationen och om befintlig mark är användbar för nyplantering. Syftet är också att titta på om växters förmåga att ta upp metaller kan användas för att rena mark från samma ämnen. Frågor som ställs i arbetet är: Är metaller i höga halter fytotoxiska, det vill säga giftiga för växter? Är befintlig mark i av gruvdriften förorenade områden i Falun användbara för plantering? Kan växter användas för att rena mark från metaller? För att besvara frågorna har en litteraturstudie gjorts.

Resultatet visar att fytotoxiska symptom såsom hämmad tillväxt, kloros, nekros och missfärgningar kan förekomma vid höga halter av vissa av metallerna. Det största problemet med markförhållandena i Falun är att upptaget hos växter av de flesta metallerna ökar vid lågt pH. Vid lågt pH löses också aluminium ut i markvätskan, vilket hämmar upptaget av nödvändiga näringsämnen och kan leda till hämmad tillväxt. Försurning i kombination med höga metallhalter leder till näringsbrist och hämmad nedbrytning av förna i tallskog vilket i sin tur leder till dålig nybildning av humus. Vid plantering av parkvegetation i befintlig mark bör kalk, eventuellt i kombination med organiskt material, användas som jordförbättring för att höja pH och därmed hämma upptaget av metaller och höja näringstillgången. Att utnyttja växters egna fysiologiska processer för att rena mark kallas fyto Remediering. Genom att använda växtmaterial som behöver växa, skördas och eventuellt nyplanteras är metoden långsammare men också billigare än konventionella reningsmetoder. Rätt val av växter för platsen är en förutsättning för att fyto Remediering ska fungera. Mer forskning och försök behövs för att kunna svara på hur effektiv och tillämpbar metoden är på de markförhållanden som finns i Falun.

INNEHÅLL

INLEDNING.....	1
BAKGRUND	1
Problemställning.....	1
Historik.....	1
Världsarvet.....	2
SYFTE OCH MÅLSÄTTNING.....	3
Frågeställningar	3
AVGRÄNSNING	3
MATERIAL OCH METOD	4
LITTERATURSTUDIE.....	5
DEL 1. MARKFÖRHÅLLANDEN I FALUN	5
Bakgrund till utförda undersökningar	5
Utförda undersökningar 1973 – 1993	6
Naturvårdsverkets generella och platsspecifika riktvärden	7
Svavel (S).....	9
pH.....	9
DEL 2. MARKFÖRHÅLLANDENAS PÅVERKAN PÅ VEGETATIONEN	11
Näringsämnen och metaller	11
Höga metallhalters påverkan på markförhållanden och vegetation	11
Svaveldioxidutsläpp och försurad mark.....	14
Näringsstatus, vegetationspåverkan och förnäringsbrytning	15
DEL 3. MARKRENING MED HJÄLP AV VEGETATION.....	17
Fytoremediering som metod	17
Tillämpning av fytoremediering.....	19
Fytoremediering av de metaller som finns i Falun	20
DISKUSSION	23
MARKFÖRHÅLLANDEN I FALUN	23
VEGETATIONSPÅVERKAN.....	24
FYTOREMEDIERING – ATT RENA MARK MED VÄXTER.....	26
REFLEKTIONER KRING TILLÄMPNING AV RESULTATET AV LITTERATURSTUDIEN UR ETT FALUPERSPEKTIV	27
Slutsatser	28
KÄLLOR.....	29

INLEDNING

BAKGRUND

Under rubriken bakgrund beskrivs min egen ingång till ämnet som det här examensarbetet handlar om. Här ges också en kortfattad historisk bakgrund till tillkomsten av Faluns markföreningarna och hur spåren av gruvdriften syns idag.

Problemställning

Min praktik under utbildningen till landskapsingenjör gjorde jag hos Miljö- och samhällsbyggnadsförvaltningen i Falun, där jag fick i uppdrag att skriva strukturen till det som ska bli *”Teknisk handbok för Falu kommun”*. Handboken kommer bland annat att innehålla anvisningar för de typer av växtbäddar och planteringar som förekommer nu och som önskas i framtiden på allmän platsmark i Falun. Under det arbetet började jag fundera på om och hur markföreningarna, som finns efter gruvdriften i Falu koppargruva, spelar någon roll för vegetationen i Falun. Och om det är så att växter påverkas negativt av föreningarna – är befintlig mark användbar för plantering av parkvegetation, eller måste jorden bytas ut? Kommunen har riktlinjer för odling av ätbara grödor med hänsyn till innehållet av bly i marken i tätorten, men för parkvegetation finns ännu inga anvisningar.

Under landskapsingenjörsutbildningen har problematiken med förorenad mark berörts mycket översiktligt. Genom att i mitt examensarbete fördjupa mig i markföreningar och hur de kan påverka vegetationen, med utgångspunkt i de konkreta förhållanden som skapats av gruvdriften i Falun, vill jag öka min egen förståelse för ämnet i stort, samt specifikt öka kunskapen om mina hemtrakter och den miljö jag förhoppningsvis kommer att verka i som landskapsingenjör.

Historik

Att gruvbrytningen har lämnat marken kring Falu koppargruva förorenad är ingen hemlighet. Kopparbrytningen i Falun har anor sedan 1000-talet, enligt analys av kopparföremål (Rydberg 1979) och genom åldersbestämning av bottensedimentet i den centralt belägna sjön Tisken (Sandberg 1996). Gruvans storhetstid inföll under 1600-talet, då Falu gruva var Europas, om inte världens, största kopparproducent och gruvan därför helt avgörande för Sveriges ekonomi (Rydberg 1979). Förutom koppar har zink, bly, silver och en mindre mängd guld brutits (Haglund & Hanaeus 2010). Produktionen och gruvans betydelse avtog under 1800-talet och den stängdes helt 1992 (Sandberg 1996).

Ekonomiska glansdagar till trots, gruvbrytningen och dess kringindustrier gav restprodukter som påverkade stadsklimatet på ett sätt som gav Carl von Linné anledning att utmåla Falun till ”helvetet på jorden” under sin Dalaresa 1734, där staden bestod av steril grusmark, svavelosande och vitriolfrätande luft och av koppar rödfärgade vattendrag (Dunér 2009).

Ännu idag är spåren av gruvan högst påtagliga. Runt gruvområdet och ner mot stadskärnan breder ett kuperat stenlandskap ut sig. Haglund och Hanaeus (2010) förklarar att högarna som syns består av restprodukterna slagg, som innehåller en stor andel järn och svavel, och varp, som är berg utsorterat från den önskvärda malmen och som innehåller en hög andel utlakningsbara metaller (se figur 1 för högar av slagg/varp). Gruvan har historiskt genererat en rad kringindustrier, såsom tillverkning av svavelsyra och rödfärg. Rödfärgsråvaran består av vittrad varp och ligger i synliga högar (se figur 2 för högar av rödfärgsråvara). Rödfärgstillverkningen är den enda industri som fortfarande är i drift på gruvområdet. Svavelsyratillverkningen har gett upphov till restprodukten kisbränder, som har en kornstorlek motsvarande silt till fingrus. Vid svavelsyratillverkningen utvanns svavel ur malm genom upphettning och restprodukten kisbränder har en hög andel lakbara metaller.

Anrikningssand är den modernaste formen av avfall från metallutvinningen (från 1900-talet) och har ett högt sulfidinnehåll.

Slagg har använts som fyllnadsmassor vid vägbyggen och under västra delen av staden längs Faluån upp mot gruvan ligger bebyggelsen på ett par meter tjockt slagglager (Sandberg 1996). Från 1960-talet och framåt har flera projekt och utredningar kring metallläckage från gruvavfallet och hur det ska hanteras gjorts, i syfte att minska utlakning till vattendrag (i förlängningen för att minska Östersjöns metallbelastning) och att minska halterna av metallstoft i luften (Christiansson, Elert & Jones 1998; Hanaeus 2010). Se figur 3 för lokalisering av gruvavfall i Falun.



Figur 1. Högar av slagg/varp i centrala Falun 2016.
Foto Stina Jansson, maj 2016.



Figur 2. Rödfärgsråvara på gruvområdet 2016.
Foto Stina Jansson, maj 2016.

Världsarvet

År 2001 blev gruvan, staden och den omgivande bergsmansbygden utsett till världsarv av FN-organet UNESCO, eftersom miljön anses vara värdefull för hela mänskligheten att bevara (Haglund & Hanaeus 2010). Motiveringen lyder:

”Det historiska industrilandskapet kring Stora Kopparberget och Falun utgör ett av de främsta områdena för gruvhantering och metallproduktion. Gruvdriften upphörde vid 1900-talets slut, men har genom många århundraden haft ett starkt inflytande på teknisk, social och politisk utveckling i Sverige och Europa.” (Haglund & Hanaeus 2010)

Att området är ett världsarv innebär att det ska garanteras skydd och vård för all framtid, vilket betyder att helheten i gruvmiljön, särskilt de äldre upplagen av slagg och varp, ska bevaras som det är. Efterbehandlingsåtgärder som att täcka in dem eller schakta bort dem är inte möjligt att utföra, eftersom det skulle påverka kulturmiljövärdena negativt (Haglund & Hanaeus 2010).

SYFTE OCH MÅLSÄTTNING

Syftet med arbetet är att ta reda på hur markförhållandena i Falun, avseende förekomst av metaller, svavelföreningar och pH-värde, påverkar biologiska och fysiologiska processer hos vegetationen och om befintlig mark är användbar för nyplantering. Syftet är också att titta på det omvända förhållandet – kan vegetation användas för att rena mark från metaller.

Att kunna använda befintlig mark vid till exempel exploatering av nya områden kan vara en god idé ur både ekonomiskt och ekologiskt perspektiv – borttransport av befintliga massor och dittransport av ny jord kostar pengar och kräver förbränning av fossila bränslen. Att transportera bort befintliga massor kräver också att de deponeras någon annanstans, vilket kan bli kostsamt och löser inte nödvändigtvis problemen med föroreningar – problemet bara flyttas till annan plats. Vid utläggning av stora volymer ny växtjord finns också risken att den kompakteras eller får en störd struktur, varför det ofta är bra att plantera i befintlig jord, om dess egenskaper tillåter det. Om naturligt förekommande växtfysiologiska processer kan användas för att sanera mark från föroreningar skulle det kunna vara en kostnadseffektiv och resursbesparande metod för att tillgängliggöra till exempel industrimark för andra syften, till exempel förtätning av stadsbebyggelse eller gröna rekreationsytor, vilket kan vara aktuellt i urbana postindustriella miljöer.

Arbetet utgår från markförhållandena i Falun och de värden som uppmätts där. De effekter som dessa förhållanden har på vegetationen kan dock ses som generella och därför applicerbara på andra platser med liknande markförhållanden. Avsnittet om markrening med hjälp av växter ska också i första hand ses som en generell studie av hur metoderna skulle kunna användas på platser med liknande föroreningar som i Falun.

Målsättningen med arbetet är att få en ökad generell förståelse för vilka konsekvenser markföroreningar orsakade av gruvbrytning såväl som andra industrier har för markförhållanden och vegetation, och om det går att använda vegetation för att långsiktigt sanera dessa.

Frågeställningar

Frågor som besvaras i arbetet:

- Är metaller i höga halter fytotoxiska, det vill säga giftiga för växter?
- Är befintlig mark i av gruvdriften förorenade områden i Falun användbar för plantering?
- Kan växter användas för att rena mark från metaller?

AVGRÄNSNING

För att uppfylla syfte och målsättning med arbetet och svara på frågeställningarna har några avgränsningar gjorts. Avgränsningarna är satta för att arbetet ska kunna genomföras inom ramen av 15 högskolepoäng och för att hålla arbetet inom landskapsingenjörens kompetensområde. Av den anledningen avgränsas arbetet till att inte gå på djupet med alla detaljer i markkemiska och växtfysiologiska processer, utan tar upp det som anses vara viktigast för att skapa en generell förståelse för ämnet.

Arbetet avgränsas till att enbart studera de markförhållanden och föroreningar som finns uppmätta i Falun och som är relaterade till Falu gruva. Problematiken med urlakning av metaller från avfallsupplagen runtom gruvan och dess följder för vattendrag berörs endast som bakgrundsinformation och arbetet avgränsas till att i litteraturstudien enbart beröra föroreningar på mark och inte i vatten. Arbetet avgränsas också till att studera vilken påverkan markföroreningar har på vegetation, och utesluter dess påverkan på djur och människor. Enbart naturligt förekommande vegetation och planterad parkvegetation berörs. Odling av ätbara grödor utesluts. Föroreningars sekundära påverkan på djur och människor genom intag av ätliga delar på park- och skogsvegetation utesluts också.

MATERIAL OCH METOD

Källmaterial för arbetet är rapporterna *Markens metallinnehåll i Falu tätort med omgivning* (Sandberg 1995), *Metaller i mark i Falu tätort, Fördjupad miljö- och hälsoriskbedömning* (Christiansson, Elert & Jones 1998), samt *Faluns historiska svavelbelastning* (Bergholm, Löfgren & Qvarfort 1998), vilka redovisar markkemiska undersökningar som gjordes mellan åren 1973 och 1993. Undersökningarna som redovisas i rapporterna gäller fortfarande som underlag för riktlinjer utfärdade av Falu kommun, och är de som varit tillgängliga i arbetet med den här uppsatsen.

För att analysera källmaterialet och svara på frågeställningarna har en litteraturstudie gjorts. Litteratursökning har gjorts genom SLU-bibliotekets söktjänst Primo samt Google Scholar. Sökord och fraser har varit bl a *föroreningar, tungmetaller, heavy metals, contaminated soil, mine waste, växter, vegetation, plants, trees, påverka, effect, phytotoxicity*.

Den litteratur som har använts är i huvudsak vetenskapliga artiklar, men också myndighetsrapporter, tryckta verk, uppslagsverk, information på webbsidor och ett examensarbete. Markkemi och växtfysiologi är ämnen som det har forskats inom länge, varför användbar information finns att hämta även i litteratur som inte är av senaste datum.



Figur 3. Lokalisering av gruvavfall i Falun. Färgmarkeringar runt Falu gruva innebär avfall av olika typer.
©Lantmäteriet Falu kommun Geodatasamverkan och Mät & karta, Falu kommun. Falu kommun 2016.

DEL 1. MARKFÖRHÅLLANDEN I FALUN

För att studera om och hur markföroreningarna i Falun påverkar vegetationen har det varit nödvändigt att ha ett utgångsmaterial som beskriver markförhållandena. I den här delen presenteras de utförda markundersökningar i Falun som studerats. Uppmätta värden jämförs med Naturvårdsverkets generella riktvärden.

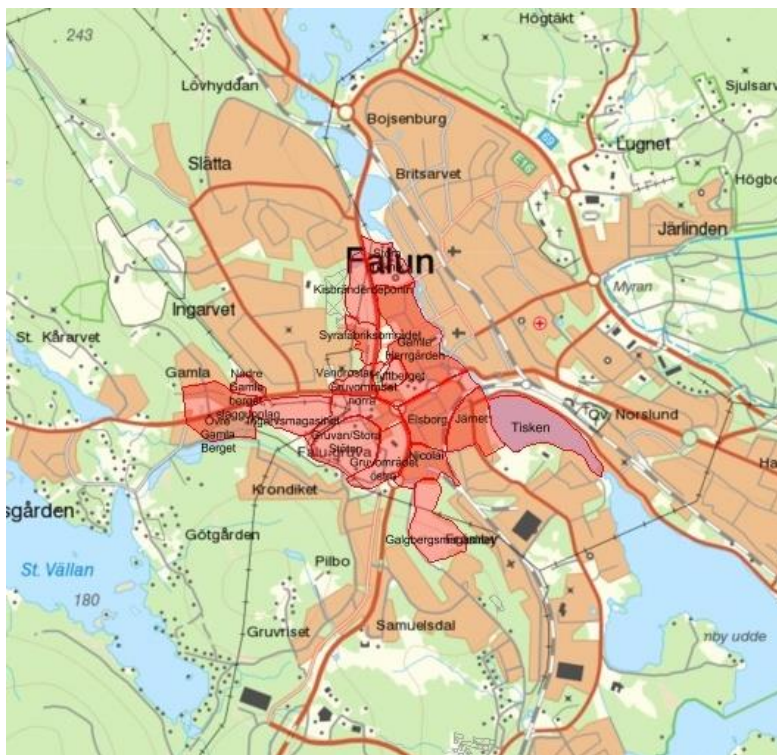
Bakgrund till utförda undersökningar

Järnmalmgruvor och sulfidmalmgruvor skiljer sig åt i mängd läckta metaller och därmed också i grad av konsekvenser för miljön. Avfallet från järnmalmgruvor har ett litet läckage av metaller, medan avfallet från sulfidmalmgruvor, såsom Falu gruva, lätt vittrar och frigör tungmetaller (Nordlander 2004). Föroreningarna i Falun kommer från de olika typerna av gruvavfall, som tidigare nämnts. I de rapporter som har studerats i det här arbetet har undersökningar gjorts av mark, av nedfallande stoft och i vatten genom utlakning från avfallet.

Haglund och Hanaeus (2010) skriver att som en följd av regeringens beslut att rena Dalälven (som har sitt utlopp i Östersjön) inom tio år från och med 1987 (den så kallade Dalälvsdelegationen), träffades 1992 ett avtal om att genomföra åtgärder för efterbehandling av gruvavfallet mellan gruvbolaget STORA och tillsynsmyndigheterna Naturvårdsverket, Länsstyrelsen i Dalarnas län och Falu kommuns miljönämnd. Haglund och Hanaeus skriver vidare att för att genomföra åtgärderna skapades Faluprojektet, som pågick fram till 2010, vilket har lett till bland annat tvättning och sluttäckning av kisbränderdeponin vid före detta svavelsyrafabriken och sluttäckning av ett sandmagasin, flytt av rödfärgsråvara inom gruvområdet samt ett separat reningssystem för lakvattnet från gruvområdet, istället för att det renas tillsammans med avloppsvattnet i kommunens reningsverk. Se figur 4 för utbredning av metaller i mark och vatten.

Ett stort antal undersökningar har gjorts genom åren, av föroreningar i mark, vattendrag, grundvattenflöden och av nedfallande stoft. De tidigaste undersökningar som finns med i underlagsmaterialet till Faluprojektet är från slutet av 1960-talet (Haglund & Hanaeus 2010). Undersökningarna har gjorts i olika omfattning, med olika metoder och av olika aktörer, till exempel förvaltningen för Miljö- och hälsoskydd inom Falu kommun och SLU.

I det här arbetet är den markkemiska statusen i Falun uppdelad i metaller, svavel och pH-värde. Uppdelningen är gjord för att lättförståeligt redovisa det resultat av litteraturstudien som är nödvändigt för att svara på frågan hur förhållandena i förorenad mark kan påverka vegetation. Målet är att ge en överblickbar förståelse för bakgrunden till föroreningarna, hur/när de har uppmäts och om de ger effekter för vegetationen.



Figur 4. Utbredning av metaller i mark och vatten. Färgmarkeringar i centrala Falun visar utbredning av metallföroreningar. ©Lantmäteriet Falu kommun Geodatasamverkan och Mät & karta, Falu kommun. Falu kommun 2016.

Utförda undersökningar 1973 – 1993

Under åren 1973 – 1993 gjordes flertalet undersökningar av (skogs-)markens metallinnehåll i Falun. Det är det källmaterialet som riktlinjer gällande markens metallinnehåll fortfarande baseras på, till exempel i råd riktade till allmänheten gällande odling av ätbara grödor (Falu kommun 2015). Det finns nyare provtagningar som gjorts vid till exempel nyexploatering, men det materialet finns inte tillgängligt för det här arbetet och enligt Hans G Johansson¹ på Miljö- och samhällsbyggnadsförvaltningen bekräftar dessa nyare prover tidigare halter och utbredning av gruvmetaller i förna och humus i skogsmark.

Utförande och omfattning av undersökningarna 1973 – 1993 skiljer sig åt, varför endast delar av dem går att redovisa tillsammans (Sandberg 1995). Värdena som det här arbetet baseras på är hämtade från en undersökning gjord av *Miljö- och hälsoskydd, Falu kommun, 1991*, där prover togs på 51 lokaler i Falu tätorts omgivning samt några lokaler ett par mil nordväst om tätorten. Proverna togs från humusskiktet i torr-frisk tallskog och i fem lokaler också från förna och mineraljordens övre skikt. Tjocklek på förna och humusskikt mättes och vegetationen beskrevs. Fosfor, kalium, pH och tio metaller analyserades. Målsättningen med undersökningen var att kartlägga markens metallhalter bland annat som underlag för fysisk planering och för bedömning av hälsorisker (Sandberg 1995).

Resultatet av undersökningen finns sammanställt i rapporten *Markens metallinnehåll i Falu tätort med omgivning* (Sandberg 1995). Sandbergs sammanställning av undersökningen från 1991 har använts som underlag för att i det här arbetet ta reda på vilka metaller som förekommer i höga halter i Falun, eftersom undersökningen är tydligt redovisad och är tillgänglig.

¹ Hans G Johansson Miljöinspektör Miljö- och samhällsbyggnadsförvaltningen Falu kommun, mailkontakt 2016-03-15.

Markens buffringssystem

Hur kan jordprover som är över tjugo år gamla fortfarande vara aktuella? Varför antas inte metallhalten ha förändrats nämnvärt?

Ashman och Puri (2002) skriver att näringsämnen finns dels lösta i jonform i markvätskan, dels bundna till organiskt och oorganiskt material. När växter tar upp ämnen från marken genom rötterna kompenseras uttaget genom att nya joner kommer ut i markvätskan. Förmågan att kompensera för förändringar i sammansättningen av joner i markvätskan kallas markens buffringssystem, vilket syftar både till näringsinnehåll och till pH. Lerjordar har hög buffringsskapacitet, vilket gör att koncentrationen av näringsämnen behålls hög och att pH-värdet inte förändras, trots upptag av växter och urlakning. Sandiga jordar har låg buffringsskapacitet och förlorar därför lätt näringsämnen och varierar i pH-värde. Olika metaller binds olika hårt i jorden och kan därmed ackumuleras under en längre tid, medan andra är lättlösliga och urlakas nedåt genom markprofilen (Ashman & Puri 2002; Sandberg 1995).

Naturvårdsverkets generella och platsspecifika riktvärden

Naturvårdsverket (2010) har tagit fram en modell för beräkning av generella riktvärden för förorenad mark. Riktvärdena ska användas som ett av flera verktyg vid riskbedömning av förorenad mark, vilket är en del i val av efterbehandlingsmetod på platsen. Efterbehandling av förorenade områden (till exempel genom täckning eller schaktning) syftar till att skydda människor som vistas på området, markmiljön, ytvatten och grundvatten. Att riskbedöma och efterbehandla förorenade områden är en del av att uppfylla kraven i Miljöbalken och de politiska miljömålen.

Naturvårdsverkets utgångspunkter rörande markmiljön, är att markmiljön bör skyddas så att de ekosystemfunktioner som behövs för den planerade markanvändningen långsiktigt upprätthålls. Två olika typer av markanvändning används vid beräkning av riktvärden; känslig markanvändning (KM), som är där människor vistas en hel livstid, till exempel bostäder, och mindre känslig markanvändning (MKM), som är där människor vistas under yrkesverksam tid, till exempel kontor och industrier, samt där barn och äldre vistas tillfälligt.

Olika minimikrav sätts beroende på markanvändning. För känslig markanvändning:

"...sätts skyddsnivån så att markens förmåga att utföra ekologiska processer (till exempel markandning och omsättning av näringsämnen) inte begränsas. I riktvärdesmodellen utgår man från att 75 procent av de marklevande arterna skyddas vid KM. För vissa föroreningar finns även fältdata som visar att markprocesserna inte påverkas om 75 procent av arterna skyddas." (Naturvårdsverket 2010)

Vid mindre känslig markanvändning:

"...bör marken kunna stödja de ekologiska funktioner som krävs av markanvändningen, till exempel odling av prydnadsväxter, gräs och annan vegetation för att förhindra damning och erosion. Djur bör också tillfälligt kunna vistas inom området. Riktvärden har därför valts som motsvarar skydd av 50 procent av marklevande arter." (Naturvårdsverket 2010)

Naturvårdsverket skriver vidare att riktvärdena är satta för att ge skydd mot hälso- och miljöeffekter och är beräknade för vanliga förorenade områden i Sverige baserade på generella ekotoxikologiska data. Riktvärdena anger den högsta acceptabla föroreningshalt med hänsyn till människor, miljö och naturresurser och fungerar inte ensamma, utan måste ses som ett av flera verktyg i en samlad riskbedömning av ett område, där förutom markanvändning, faktorer som spridningsvägar, skydd av grund- och ytvatten och biologiska värden behöver vägas in. När de generella riktvärdena inte räcker till för att ge skydd åt markfunktionerna kan en platsspecifik bedömning i viss mån göras. Utifrån situationen i Falun har *Metaller i mark i Falu tätort. Fördjupad miljö- och hälsoriskbedömning* (Christiansson, Elert & Jones 1998) tagits fram för att ytterligare studera vad halterna av tungmetaller i mark betyder för människors hälsa.

Se tabell 1 för jämförelse av Sandbergs (1995) sammanställning av de metallhalter som uppmätts av Miljö- och hälsoskydd, Falu kommun 1991 och Naturvårdsverkets (2010) generella riktvärden för samma metaller.

Syftet med jämförelsen är att tydliggöra hur höga de uppmätta halterna är i förhållande till de värden som Naturvårdsverket bedömer är högsta acceptabla halter för känslig markanvändning respektive mindre känslig markanvändning.

Tabell 1. Jämförelse av Naturvårdsverkets generella riktvärden (Naturvårdsverket 2010) och uppmätta metallhalter i Falun 1991 (Sandberg 1995).

Metall	Naturvårdsverkets generella riktvärden (mg/kg torrsubstans)		Halter i mark i Falun enligt Miljö- och hälsoskydd 1991 (mg/kg torrsubstans)	
	KM*	MKM**	Medel	Max
Arsenik	10	25	24,8	204
Bly	50	400	483	2910
Kadmium	0,5	15	0,64	1,1
Kobolt	15	35	0,99	3,39
Krom***	80	150	5,04	27,7
Koppar	80	200	132,9	496
Kvicksilver	0,25	2,5	0,64	1,83
Mangan****			170,8	721
Nickel	40	120	3,13	7,56
Zink	250	500	261,5	5110

*KM Känslig markanvändning

**MKM mindre känslig markanvändning

*** Totalkrom. Krom kan också förekomma i sexvärd form, men det är osannolikt att det förekommer som förorening i Falun (Christiansson, Elert & Jones 1998; Hanaeus 2010).

**** Naturvårdsverket har inget riktvärde för mangan.

Sammantaget visar jämförelsen att halterna av kobolt, krom och nickel är låga och ligger under Naturvårdsverkets riktvärden för både känslig och mindre känslig markanvändning. Medelvärde för arsenik överskrider däremot halten för känslig markanvändning och maxvärdet överskrider också i mindre känslig markanvändning. För bly överskrider medelvärdet både känslig och mindre känslig markanvändning.

Kadmium överskrider känslig markanvändning men klarar mindre känslig markanvändning och medelvärdet för koppar överskrider kraftigt värdet för känslig markanvändning och maxvärdet överskrider mer än dubbelt värdet för mindre känslig markanvändning. Medel och maxvärdet för kvicksilver överskrider värdet för känslig markanvändning och för zink överskrider medelvärdet känslig markanvändning och maxvärdet överskrider mer än tio gånger värdet för mindre känslig markanvändning.

Mangan finns inte med i Naturvårdsverkets tabell för generella riktvärden, men de uppmätta värdena berörs i sammanställningen av 1991 år markundersökning.

För att besvara det här arbetets frågeställning om metaller i höga halter är giftigt för växter, kommer de metaller som förekommer i halter som överskrider de generella riktvärdena att studeras vidare. De metaller som enligt en jämförelse med riktvärdena är förhöjda, och som detta arbete fokuserar på är således arsenik, bly, kadmium, koppar, kvicksilver och zink. Mangan tas också med, eftersom det är av betydelse i sammanhanget.

Svavel (S)

Svavel är ett icke-metalliskt grundämne som förekommer som svavelkristaller eller i föreningar med andra grundämnena och som i jonform kallas för sulfid (NE 2016). Malm är den sammansättning av mineraler i berg, som bryts för att utvinna metaller (NE 2016). Den malm som brutits i Falu gruva är sulfidmalm och har innehållit den högsta halten svavel av landets sulfidmalmgruvor (SGU 1993 se Bergholm, Löfgren & Qvarfort 1998), vilket lett till extrema svavelutsläpp till luften under de århundraden som gruvan och dess kringindustrier var i drift.

Bergholm, Löfgren & Qvarfort (1998) skriver att svavelutsläppen har sitt ursprung i malmbrytningen på den tiden då berget spräcktes genom eldning samt bearbetningen av malmen skedde genom upphettning, så kallad rostning, vilket innebar att svavel avgick till luften som svaveldioxid, liksom från tillverkningen av svavelsyra, som skedde från mitten av 1800-talet till början av 1990-talet.

Bergholm, Löfgren & Qvarfort skriver vidare att hur mycket av svavelutsläppen som i partikelform faller ner till marken och deponeras där kan beräknas med hjälp av simuleringar av utsläppshalter, genom uppgifter om mängd bruten malm och hänsyn tas till temperatur, vindriktning, vindhastighet och om marken är bar eller täckt av vegetation (större mängd partiklar deponeras på skogsmark än på barmark). Författarna har sammanställt beräkningar av den ackumulerade svaveldepositionen, som är gjorda genom uppgifter om mängd bruten malm och råkopparproduktion för gruvans drifttid från 1200-talet till dess stängning 1993.

Samma författare menar att det finns en stor osäkerhet i dessa beräkningar, och för att i det här arbetet studera de generella effekterna av svavelutsläpp har ingen ytterligare fördjupning i detaljerade värden gjorts. Huvudentagandet utifrån källmaterialet är att utsläppen av svaveldioxid har varit enormt, särskilt under gruvans storhetstid på 1600-talet, då det lokala utsläppet för Falun ett enskilt år kan ha varit runt 40 000 ton svaveldioxid, vilket kan jämföras med att det totala utsläppet för hela Sverige år 1991 uppgick till 107 000 ton (Bergholm, Löfgren & Qvarfort 1998) och år 2002 till drygt 60 000 ton (Sundström 2002). En beräkning av utsläppsvärdena säger att sammanlagt har upp till 64 kg svaveldioxid tillförts varje kvadratmeter mark inom en radie av en kilometer från gruvan (Sundström 2002).

Prover tagna på fyra platser 1994 visar ett medelvärde på 1000 kg svavel per ha^{-1} ner till 50 cm djup, vilket är tre gånger mer än vid en jämförelse med prover tagna ner till en meters djup i Mellansverige (Bergholm, Ek, Löfgren & Qvarfort 2001).

pH

pH är ett logaritmiskt mått på koncentrationen av vätejoner i en lösning där en högre koncentration ger surare vätska och lägre pH-värde (NE 2016). pH-värdet i mark påverkas av många faktorer, som vilken typ av organiskt material som bryts ner och berggrundens sammansättning (skogsmark är i allmänhet sur) men också i stor utsträckning av föroreningar orsakade av mänsklig aktivitet. pH-värdet påverkar en rad aktiviteter i marken, som växters förmåga att ta upp näringsämnen liksom tungmetaller och graden av mikrobiologisk aktivitet (Ashman & Puri 2002).

Sandberg (1995) redovisar pH-mätningarna från undersökningen 1991 samt gör en övergripande jämförelse med resultatet av en undersökning som Miljö- och hälsoskydd, Falu kommun, gjorde 1992 på 46 lokaler i kommunen.

Bergholm, Löfgren & Qvarfort (1998) behandlar pH-mätningarna från en undersökning som gjordes av Bergholm, SLU, 1973-74, då prover togs från humusskiktet (O-horisonten), urlakningsskiktet (E-horisonten) samt på fyra olika nivåer per grop i B-horisonten, på ett åttiotal provplatser i skogsmark i och runt Falu tätort. Författarna gör också en jämförelse mellan sjuttioalets undersökning och en undersökning från 1994, där markprofilen på fem platser undersöktes.

Sandbergs (1995) sammanställning visar att i undersökningen från 1991 ligger pH-värdet i humusskiktet under 4 i både tätorten och kringliggande skogsmark. Undersökningen från 1992 bekräftar samma resultat. 1992 års undersökning visar att mineraljorden på en meters djup i C-horisonten är påverkad av markförsurning och författaren redovisar pH-värdet på provplatserna på en skala från $\text{pH} > 6,2$ till $\text{pH} < 5,0$.

Bergholm, Löfgren & Qvarforts sammanställning av undersökningen från 1973-74 visar att pH-värdet i humusskiktet på majoriteten av provplatserna ligger mellan 2,8 och 3,8 och på resterande del mellan 3,8 och 4,9, med ett medianvärde på pH 3,3. I urlakningsskiktet varierar pH mellan 3,1 och 4,0 och i B-horisonten varierar värdena mellan 3,2 och 5,0, med stigande värde ju längre ner i horisonten proverna togs.

Enligt Bergholm, Löfgren & Qvarfort visar undersökningen från sjuttiotalet att försurningen i humusskiktet är utbredd över ett stort geografiskt område, som i underliggande mineraljordslager minskar ner och koncentrerar försurningen till området närmast tätorten, vilket kan kopplas ihop med att utsläppen av försurande ämnen skett närmast gruvan. Jämförelsen med undersökningen från 1994 visar att ingen större förändring skett, förutom ett jordprov från 1994 som togs på mjälajord och visade ett lägre pH än övriga prover som togs på sandig moig morän.

Jämförelsen mellan de olika undersökningarna visar att pH i humusskiktet i stort sett ligger under 4, ända ner till 2,8, i både tätort och skogsmark. Att humusskiktet är surt är normalt, eftersom det innehåller organiska syror från nedbrutna växtdelar. Ett humuslager på 4 eller strax under är normalt för skogsmark (MarkInfo 2007).

I urlakningsskiktet varierar pH mellan 3,8 och 4,0. I mineraljorden varierar värdet från 3,2 i den översta delen av B-horisonten till cirka 6 i C-horisonten. pH i mineraljord påverkas av det geologiska materialet, och ett normalt värde i skogsmark är svagt surt, mellan 5,2 och 5,4 (MarkInfo 2007). Bergholm, Löfgren & Qvarfort (1998) menar att försurningen i mineraljorden närmast Falu tätort är en följd av försurande ämnen från en lång tids gruvindustri.

DEL 2. MARKFÖRHÅLLANDENAS PÅVERKAN PÅ VEGETATIONEN

I det här stycket beskrivs näringsämnena och hur de tas upp av växter. Vidare beskrivs hur de specifika metaller som finns i förhöjda halter i Falun tas upp av växter och vilka fytotoxiska effekter de kan ha. Stycket avslutas med hur näringsstatusen i Falun ser ut och vilka följder det fått samt metoder för att förbättra näringstillgängligheten.

Näringsämnena och metaller

Eichhorn, Evert och Raven (2005) förklarar att växter behöver både organiska och oorganiska näringsämnen för att dess biokemiska processer ska fungera. De näringsämnena som växten behöver för att inte visa bristsymptom, upprätthålla alla processer och kunna slutföra sin livscykel kallas essentiella, och bland de essentiella näringsämnena finns också vissa metaller. Författarna skriver vidare att växter också kan ta upp många fler ämnen än de essentiella – över 60 olika kemiska ämnen har hittats i växtdelar. Vad som hittas i växten speglar markinnehållet, varför det är intressant att undersöka hur växter påverkas av upptaget, och om och hur växter kan användas för att sanera mark från föroreningar.

De essentiella näringsämnena delas enligt Eichhorn, Evert och Raven upp i makro- och mikronäringsämnena, där makronäringsämnena behövs i stor mängd (minst 1000 mg/kg torrsubstans) och mikronäringsämnena i mycket liten mängd (max 100 mg/kg torrsubstans). Syre, väte och kol är självklara makronäringsämnena, som tillgodoses genom de grundläggande förutsättningarna för växtlighet – luft och vatten. De viktigaste makronäringsämnena i mark är kväve, fosfor och kalium, och därutöver behövs sulfat, magnesium, kalcium. Mikronäringsämnena är enligt samma författare molybden, nickel, koppar, zink, mangan, bor, järn och klor. Bland de essentiella näringsämnena finns några av de tungmetaller som i Falun finns i mycket högre halter än vad riktvärden tillåter. Tungmetaller kan således vara livsnödvändiga i rätt mängder.

Höga metallhalters påverkan på markförhållanden och vegetation

Hur metaller påverkar vegetation är ett komplext ämne, där en viss mängd av ett visst ämne i mark inte helt enkelt behöver betyda ett visst upptag av ämnet av växter. Växtfysiologiska processer som påverkar hur stor mängd metaller som tas upp av en växt är enligt Alloway (1990) bland annat den specifika metallens koncentration och bindning i mark och markvätska, hur metallen rör sig från mark till rotyta och transport från rotyta in i roten och vidare från rot till skott.

Raskin et al. (1994) beskriver att hur växter påverkas av att växa på mark med höga metallhalter beror på vilka av dessa processer som är aktiva, och utifrån det kan grupper med olika överlevnadsstrategier urskiljas. Exkluderare hindrar metaller från att transporteras till växtens ovanjordiska delar och kan lagra stora mängder metaller i rötterna. Icke-exkluderare transporterar metaller till de ovanjordiska växtdelarna och kan delas in i två undergrupper: indikatorer och hyperackumulatorer, där halterna samlade i indikatorväxter visar på innehållet i marken, medan hyperackumulatorer kan koncentrera högre metallhalter än i den omgivande marken i sina vävnader.

Gallagher et al. (2008) lägger till att ackumulering av metaller i växten proportionellt till halten av samma metaller i mark är en strategi, där växten tar upp metaller till ett mättat tillstånd, där antingen homeostas (jämviktsförhållande) eller hämmad tillväxt inträffar.

Alloway (1990) förklarar att rotens upptag av metaller från marklösningen sker genom absorption och upptaget av hårt bundna metaller ökar ju mer rotyta växten producerar. Absorptionsmekanismerna kan enligt författaren variera mellan olika metalljoner, och joner som tas upp på samma sätt kan konkurrera med varandra. Förutom upptag genom rötterna kan ämnen också tas upp genom bladen, varför luftburna föroreningar också kan finnas i växten. Olika släkten och arter varierar i känslighet för både föroreningar och brister.

Förekomst av mykorrhiza, det vill säga symbios mellan svamp och trädrötter där svampen gynnar trädet genom att öka dess upptag av vatten och näring (Eichhorn, Evert & Raven 2005), verkar enligt Lepp (1995) kunna

minska upptaget av tungmetaller. Lepp nämner att pionjärarter, som till exempel björksläktet (*Betula sp.*) och pilsläktet (*Salix sp.*), som växer på metallförorenad mark har mycket mykorrhiza.

Nedan följer en genomgång av vad litteraturstudien visar angående tillgänglighet, upptag och toxiska effekter av de metaller som finns i höga halter i Falun. Se tabell 2 för sammanställning av höga metallhalters påverkan på markförhållanden och vegetation.

Arsenik (As)

Alloway (1990) skriver att växters upptag av arsenik vanligtvis inte är speciellt högt och till och med i mark med höga halter av arsenik innehåller växter inte skadliga halter av ämnet. Generellt ökar upptaget och den toxiska effekten av arsenik med sjunkande pH, speciellt pH under 5, men upptaget kan motsatt också öka med ett högre pH. Alloway, som visserligen refererar till jordbruksgrödor, skriver att en fytotoxisk effekt av arsenik är plötslig minskning av vattenupptag i roten och missfärgning följt av nekros (vävnadsdöd) i bladspetsarna.

Alagic et al. (2013) nämner också några fytotoxiska effekter av arsenik: hämmad tillväxt, missfärgade rötter, visnande blad, att växten antar en rödlila färg som följd av att pigmentet antocyanin ökar samt i vissa fall plasmolys (att cellerna förlorar vatten).

Alagic et al. har undersökt hur arsenik tas upp av björksläktet (*Betula sp.*) och lindsläktet (*Tilia sp.*) på mark som är förorenad på grund av kopparutvinning, genom att mäta halterna av ämnet i rötter och blad. Generellt visar undersökningen att för båda släktena hittades de högsta halterna i individer som vuxit på mark med lågt pH och högst koncentration av metaller. Alla undersökta individer verkade dock friska utan symptom på kloros (bleka eller vita blad) eller nekros.

Bly (Pb)

Enligt Christiansson, Elert & Jones (1998) visar undersökningar att det bly som finns i marken i Falun är hårt bundet som bly sulfid inuti järnmineral och därför har låg biotillgänglighet. Andelen svårslösligt bly ökar med ökad halt bly i marken och andelen lättlösligt, och därmed växttillgängligt bly, är låg i humusskiktet men ökar med jorddjupet (Ahlgren 1996 se Christiansson, Elert & Jones 1998). Enligt Johnsson (1995) tas bly främst upp av växter i formen Pb^{2+} och gynnas bland annat av lågt pH och låg halt organiskt material. Det kan betyda att det finns låg halt växttillgängligt bly i humusskiktet men mer längre ner i mineraljorden, men att den största andelen bly i Falun ändå är svårslösligt (Christiansson, Elert & Jones 1998).

Gallagher et al. (2008) fann i sin undersökning att halten bly i rötter var lägre än i omgivande jord och ämnet inte transporteras vidare till ovanjordiska växtdelar. Kumar et al. (1995) skriver att i försök med vegetation på blyförorenad mark visade alla växter en hämmad tillväxt av rötter och skott, liksom dålig bladutveckling. Växter i kålsläktet (*Brassica sp.*) fick även pigmentering av antocyaniner (rödlila färgämne) på blad och stam.

Kadmium (Cd)

Johnsson (1995) skriver att kadmium är lättlösligt inom växter, tas lätt upp och upptaget ökar med ökande halt i marken. Andelen lättlösligt kadmium i jonform, och därmed växttillgängligheten, ökar med ett pH-värde under 6 liksom vid hög saltkoncentration i markvätskan. Enligt Sandberg (1995) varierar inte kadmiumhalten speciellt mycket mellan de undersökta områdena i Falun.

Alagic et al. (2013) bekräftar att kadmium är lättlösligt men skriver att olika växter får olika fytotoxiska effekter av kadmium, varför det finns motstridiga uppgifter om vilka dessa effekter är och var i cellvävnaden ämnet ackumuleras. I sin undersökning av metallupptaget i björk och lind fann Alagic et al. de högsta koncentrationerna av kadmium i rötterna, samt att upptaget följde samma mönster som för arsenik, det vill säga högre halter uppmättes på de mest förorenade platserna med lågt pH, samt att alla undersökta individer ändå verkade vara friska.

Koppar (Cu)

Upptaget av koppar gynnas av ett lågt pH, och hämmas av tillförsel av kalk, organiskt material och fosfat (Johnsson 1995). Det verkar som att det essentiella näringsämnet koppar regleras internt i växter, så att en konstant koncentration hålls, oberoende av omgivande halter i marken (Timberly et al. 1970 se Johnsson 1995), upp till den mycket höga halten av minst 1000 mg/kg⁻¹ i marken då regleringssystemet slutar fungera och halten i växten ökar (Baker och Brooks 1989 se Johnsson 1995). Halten i Falun når inte upp till den nivån, varför det skulle betyda att växterna själva reglerar upptagsnivån av koppar.

Gallagher et al. (2008) fann att koppar, liksom bly, inte transporteras vidare till ovanjordiska växtdelar, och att halten i rötterna var lägre än i den omgivande jorden. Chatzistathis, Alifragis, och Papaioannou (2014) har studerat plantor av robinia (*Robinia pseudoacacia*) och poppelsläktet (*Populus sp.*) under det första året efter etablering. Författarna fann att de toxiska effekterna av koppar är kloros i unga blad och i de flesta fall också hämmad tillväxt. På äldre blad observerades nekros, ihoprullade och små blad, korta och ibland döda skott och i några fall helt döda träd. Försöket gjordes på mark med neutralt pH och vid jämförelse med äldre träd så påverkades de inte lika allvarligt som de unga individerna. Symptom på kopparförgiftning kan uppträda vid halter på 150 mg/kg enligt Chapman (1966) i Chatzistathis, Alifragis och Papaioannou (2014), vilket inte är långt över medelhalten i Falun och långt under den uppmätta maxhalten.

Kvicksilver (Hg)

Kvicksilver är svårörligt i marken, vilket gör att halten med tiden kan byggas upp (Johnsson 1995). Alloway (1990) skriver att växters kvicksilverupptag är lågt, och att ämnet generellt ackumuleras i rötterna utan att spridas till ovanjordiska delar, men att vid halter av Hg²⁺ över 0,1 mg/kg i marken sker en viss transport till skotten. Medelhalten i Falun är över 0,1 mg/kg.

Sandberg (1995) skriver att vissa metallhalter följer samma variationsmönster, det vill säga har god korrelation, och kvicksilver, arsenik och bly är ett exempel på detta. Kvicksilver, arsenik och bly finns enligt Sandbergs sammanställning i extremt förhöjda halter i det mest metallpåverkade området som sträcker sig från Falu gruva mot sydost till området Galgberget. Peer, Baxter, Richards, Freeman & Murphy (2005) skriver att kvicksilver är toxiskt för växter, men nämner inte vilka symptom det orsakar.

Mangan (Mn)

Johnsson (1995) skriver att mangan i formen Mn²⁺ är växttillgängligt, medan mangan med andra oxidationstal är mer olösliga. Upptaget gynnas av anaeroba förhållanden och lågt pH och toxiska symptom uppkommer vid halter i löv på cirka 1500 mg/kg⁻¹. Enligt Chatzistathis, Alifragis och Papaioannou (2014) är de toxiska effekterna på de lövträd som undersökts de samma som för koppar – kloros i unga blad och nekros i äldre samt döda skott och i några fall döda träd.

Sandberg (1995) skriver att halten mangan är enligt 1991 års markundersökning onormalt låg i det område som har som mest bly, kvicksilver och arsenik. Mangan är ett viktigt spårämne som många svampar behöver för att bryta ner växtbeståndsdelen lignin, varför den låga manganhalten kan vara en orsak till den dåliga nedbrytningen av förna i området från Falu gruva till Galgberget. Inom samma geografiska område är halten växttillgängligt fosfor låg, vilket enligt Sandberg kan bero på den låga förnaredbrytningen och avsaknaden av nedbrytare.

Zink (Zn)

Johnsson (1995) skriver att zink är lösligt i mark, upptaget gynnas av lågt pH och ämnet rör sig lätt till växtens olika delar. Ivanov, Savochkin och Kuznetsov Timiryazev (2011) har studerat de toxiska effekterna av zink på unga plantor av tall (*Pinus sylvestris*) Försöket visade att vid höga koncentrationer av zink minskade frögroningen, rotsystemets utveckling och den totala tillväxten hämmades, störningar i olika organs utveckling av biomassa samt förändringar i pigment som ingår i fotosyntesen. Trots detta, menar författarna att en relativt liten del av de undersökta plantorna fick toxiska symptom och att den största andelen utvecklade tolerans mot zink.

Tichelen, Colpaert och Vangronsveld (2000) har undersökt påverkan av zink hos tall och dess samband med vissa mykorrhizasvampar. Vid en jämförelse visade unga plantor som utsatts för höga halter av zink och utan förekomst av mykorrhiza skadade rotsystem och rödaktiga barr, medan plantor som fick växa i symbios med mykorrhizasvampar fick gröna barr och välutvecklade rotsystem. pH var i försöket runt 3,5. Wilkinson & Dickinson (1995) se Tichelen, Colpaert och Vangronsveld (2000) menar att det är metallresistent mykorrhizasvamp som gör att träd kan växa på av metaller extremt förorenad mark, och inte att trädarterna själva har utvecklat resistens mot metaller.

Tabell 2. Sammanställning av höga metallhalters påverkan på markförhållanden och vegetation.

Ämne	Upptaget gynnas av	Toxiska symptom
Arsenik (As)	Lågt pH (<5), högt pH.	Minskat vattenupptag, nekros, hämmad tillväxt, ökat antocyanin, missfärgade rötter, plasmolys.
Bly (Pb)	Lågt pH, låg halt organiskt material.	Hämmad tillväxt, dålig bladutveckling, ökat antocyanin.
Kadmium (Cd)	Ökad halt i marken, lågt pH (<6), hög salthalt i markvätskan.	Inga uppgifter.
Koppar (Cu)	Lågt pH.	Unga plantor: kloros i blad, hämmad tillväxt. Äldre plantor: nekros i blad, små blad, döda skott, döda träd.
Kviksilver (Hg)	Höga halter i mark (>0,1 mg/kg).	Inga uppgifter.
Mangan (Mg)	Lågt pH, anaeroba förhållanden.	Kloros i unga blad, nekros i äldre blad. Låg nedbrytning av förna vid låga halter mangan.
Zink (Zn)	Lågt pH.	Minskad frögroning, hämmad utveckling av rotsystem, hämmad tillväxt, förändringar i pigment som ingår i fotosyntesen.

Svaveldioxidutsläpp och försurad mark

Svaveldioxid är tillsammans med kväveoxider och ammoniak det ämne som har störst betydelse för försurning av mark och vattendrag (Naturvårdsverket 2015).

I Linnés beskrivningar av Falun från sjuttonhundratalet saknas träd, gräs, örter och mossor runt gruvan (Ek, Löfgren, Bergholm & Qvarfort 2001). Enligt Ek et al. kan höga utsläpp av svaveldioxid orsaka skador på gran (*Picea abies*) och mycket höga utsläpp orsaka skogsdöd, vilket skedde under 1600-talet inom ett avstånd av några kilometer från gruvan. Författarna skriver att det under 1970-talet fortfarande dokumenterades skador på trädets blad, orsakade av svaveldioxidutsläppen. Produktionsskogen runt Falun är enligt Ek et al. dock inte påverkad av svaveldioxidutsläppen i nutid, men däremot är undervegetationen och humusskiktet i skogsmark nära gruvan stort, förmodligen på grund av höga metallhalter i marken.

pH-värdet i humusskiktet i Falun är lågt, på många platser lägre än vanligt i skogsmark, liksom i den översta delen av mineraljorden. Ek et al. (2001) skriver att i de mest försurade områdena, där också metallbelastningen är som högst, överstiger försurningen ändå inte de nivåer som finns i sydvästra Sverige och som där är orsakad av sur nederbörd.

Näringsstatus, vegetationspåverkan och förnanedbrytning

Humusskiktet bildas när förna, det vill säga barr, löv och andra döda växtdelar på marken, bryts ner av marklevande organismer. På Galgberget, som är det mest metallförorenade området (se figur 5 för lokalisering av Galgberget) är den här nedbrytningen starkt hämmad, vilket leder till att det inte bildas något nytt humusskikt (Sandberg 1995). Den påverkan på vegetationen i Falun som Sandberg (1995) nämner främst har iakttagits, är att det på området Galgberget knappt finns någon synlig vegetation förutom tallskog. Tallen ser dock vital ut. Generellt påverkas förekomsten av lavar, mossor och lingon negativt av bly, kvicksilver, arsenik, koppar, krom och kobolt. En undersökt lokal på Galgberget skiljer sig från det generella mönstret, skriver Sandberg, med ett tjockare humusskikt än de övriga lokalerna inom samma område, liksom mer lingon, lavar och mossor. Anledningen skulle kunna vara att trädsiktet där till viss del består av björk, som bildar en annan förna.

I 1991 års markundersökning analyserades lösligt fosfor och kalium, vilket i Sandbergs (1995) sammanställning visar att den växttillgängliga fosforhalten är låg på Galgberget, som är det mest metallpåverkade området. Möjliga orsaker som anges är utfällning av svårslutligt fosfat, minskad bindningsförmåga till humusskiktet, förändrad omsättning av organiskt material och avsaknad av nedbrytare som svampar och bakterier. Generella symptom på fosforbrist hos växter är mörknande och rödlila bladmassa, hämmad stamtillväxt och att de äldsta bladen blir mörkbruna och dör (Eichhorn, Evert & Raven 2005).

Genomgången av de ämnen som finns i höga halter i marken i Falun visar att de alla ökar i löslighet och växttillgänglighet med sjunkande pH. pH-värdet i humusskiktet är i det undersökta området från 4 ner till 2,8. I mineraljorden varierar pH-värdet från 3,2 i det översta skiktet till 6 i det underst uppmätta skiktet. Den förorenade marken i Falun är därmed mycket försurd, med pH-värden under de för skogsmark normala. Asensio, Covelo och Kandeler (2013) bekräftar att lågt pH och lite humus, tillsammans med höga halter av tungmetaller, är vanliga förhållanden på före detta gruvmark.

Eichhorn, Evert och Raven (2005) skriver att näringsupptaget är känsligt för förändringar i pH och hos många växter är marginalerna för tolerans små. Förekomst av mykorrhiza är för de flesta växter viktigt för absorption och transport av fosfor, men samtidigt ökar då också upptaget av, koppar och zink. Vid lågt pH blir även den i mark vanligaste metallen, aluminium, lösligt i markvätskan. Aluminium gör enligt författarna fosfor mindre tillgängligt och hindrar upptaget av järn. Ashman och Puri (2002) skriver att aluminium är fytotoxiskt eftersom det kan förhindra celldelning och hämma rötternas tillväxt. Aluminiumförgiftning kan ses på förkrympta och knubbiga rötter som inte når längre ner i marken än de översta horisonterna, vilket minskar vattenupptaget och gör växter torkkänsliga.

Ross (1995) påstår att det är möjligt att träd blir mer motståndskraftiga om de har tillräckligt tillgång till näring och vatten - som i sin tur beror på jordens näringsstatus. Olika metoder för jordförbättring kan göra toxiska ämnen mindre rörliga och gynna näringstillgången. Att använda kalk i olika former för att höja pH-värdet i mark har varit praktik i århundraden (Goulding & Blake 1998 se Vangronsveld et al. 2009). Chatzistathis, Alifragis och Papaioannou (2014) skriver att försök med kalkning har haft god effekt på att reducera halten tillgänglig koppar och mangan, och att toxiska effekter på lövträd försvann efter att kalciumkarbonat (CaCO_3) tillförts jorden. Försöket gjordes dock på jordar med neutralt pH. Kalkningen i försöket gjorde också att förnanedbrytningen och bildandet av humus ökade, vilket antas bero på att den mikrobiologiska aktiviteten ökade i och med tillförseln av kalk. Den ökade nedbrytningen medförde också att halterna av organiskt kol samt kväve sjönk. Upptaget av järn ökade i de undersökta träden. Zinkupptaget i poppel minskade genom kalkning.

Kalkning kan vara gynnsamt för att öka nedbrytningen av förna och bildandet av humus, och därmed öka näringstillgängligheten för tall (*Pinus sylvestris*) på sur skogsmark (Saarsalami et al. 2011 se Chatzistathis, Alifragis & Papaioannou 2014). Kalk kan också kombineras med tillförsel av organiskt kompostmaterial, för att både höja pH och reducera tillgängligheten hos toxiska metaller samt ge jorden tillskott av essentiella näringsämnen och förbättra strukturen (Vangronsveld et al.) PH-höjning genom kalkning i syfte att återställa förorenad mark kan dock göra arsenik rörligt (Jones, Inskeep & Neuman 1997 se Vangronsveld et al.) och det samma kan gälla för andra metaller såsom koppar. Ashman och Puri (2002) rekommenderar att jorden kalkas upp till pH 5,5, för att förhindra fytotoxiska effekter av lågt pH.

Asensio, Covelo och Kandeler (2013) har i försök med trädplantering av tall (*Pinus sp.*) och eukalyptus (*Eucalyptus sp.*) och jordförbättring med rötslam på före detta gruvmark funnit att både markens pH-värde och näringsämnenas tillgänglighet ökade med båda metoderna. Enbart trädplantering ökade inte mikrolivet i marken, men en kombination av trädplantering och rötslam ökade markant den mikrobiologiska massan. Trots det ökade mikrolivet och tillgången på näringsämnen vid tillförsel av rötslam kunde metallernas negativa inverkan spåras.



Figur 5. Området Galgbergets lokalisering i förhållande till gruvan. ©Lantmäteriet 2016. Kartan är modifierad.

DEL 3. MARKRENING MED HJÄLP AV VEGETATION

I den här delen beskrivs fyto Remediering som markreningssmetod och de processer som ingår i begreppet förklaras. Vidare undersöks hur metoden kan tillämpas och vilka växter som kan användas.

Fyto Remediering som metod

Om vissa växter har strategier för att ta upp metaller och lagra dem i vävnaden, kan de då användas för att rena förorenad mark?

Naturvårdsverket (2006) uppskattar att det finns cirka 80 000 potentiellt förorenade områden i Sverige, och många av dem är mark som skulle vara attraktivt att använda för att bygga till exempel bostäder och arbetsplatser. Innan förorenade områden tas i anspråk måste de efterbehandlas, det vill säga att föroreningarna måste bort eller på annat sätt fås under kontroll.

Det av riksdagen antagna miljökvalitetsmålet "Giftfri miljö" berör förorenade områden (Naturvårdsverket 2006). Enligt de delmål som antogs 2005 ska åtgärder

"...under åren 2005-2010 ha genomförts vid så stor andel av de prioriterade förorenade områdena att miljöproblemet i sin helhet i huvudsak kan vara löst allra senast år 2050."
(Naturvårdsverket 2006).

Att använda växter för att rena förorenad mark, så kallad fyto Remediering, är en metod som ännu inte har provats i större utsträckning i Sverige, men Andersson och Svensson (2007) skriver i sitt examensarbete att väl utformade fyto Remedieringsprojekt skulle kunna vara en metod för att nå det antagna miljömålet till 2050.

Fyto Remediering kan definieras som "rening av jord och vattendrag från skadliga substanser med hjälp av växter" (NE 2016). Pilon-Smits (2005) beskriver metoden som en teknologi som tar vara på de naturligt förekommande processer där växter och de mikroorganismer som finns i rhizosfären (rotzonen, det område i marken som är direkt påverkat av roten) bryter ner och isolerar organiska och oorganiska föroreningar.

I begreppet fyto Remediering ingår flera olika processer. Uppdelning och benämning varierar något mellan olika källor. Vangronsveld et al. (2009) nämner fytoextraktion, fyto-och rhizodegradering och fytostabilisering. Bland de processer som används för rening av mark nämner Pilon-Smits (2005) utöver dessa också fytostimulering och fytoavdunstning. Andersson och Svensson (2007) adderar hydraulisk kontroll och fytotäckning till de redan nämnda processerna. Vilka processer som bör väljas beror på förutsättningarna på platsen och föroreningarnas egenskaper (Andersson & Svensson 2007). Flera processer kan också samverka på en plats och växtvalet påverkar också vilka processer som kommer att ske. Nedan förklaras kortfattat vad de olika processerna innebär.

Fytoextraktion

Vid fytoextraktion tas föroreningar upp och ackumuleras i växternas biomassa och förs bort från marken då växtmaterialet tas bort (Andersson & Svensson 2007; Pilon-Smits 2005). Fytoextraktion används mest för att ta upp metaller och andra oorganiska föroreningar (Pilon-Smits 2005).

Växter som lämpar sig bäst för fytoextraktion ska kunna tolerera de ämnen som de ackumulerar, vara snabbväxande och snabbt ackumulera ämnen i den ovanjordiska biomassan samt vara enkla att skörda (Vangronsveld et al. 2009). Växter för fytoextraktion kan vara antingen indikatorväxter, som kan ta upp metaller i en mängd som speglar halten i marken, eller hyperackumulerare, som kan ta upp mycket högre halter (Raskin et al. 1994). Fytoextraktion är den process som omnämns oftast i litteraturen och verkar vara den mest använda i fyto Remedieringsprojekt.

Fyto- och rhizodegradering/fytostimulering

Pilon-Smits (2005) skriver att vid fytodegradering tar växter upp främst organiska föroreningar, för att sedan bryta ned dem med hjälp av enzymer. Vid rhizodegradering eller fytostimulering bryts enligt samma författare organiska ämnen ned utanför växten, i rhizosfären, med hjälp av mikrober. De nedbrutna föroreningarna kan växten använda som näring, och i vissa fall utsöndras slut- eller mellanprodukter (Andersson & Svensson 2007). För att växter ska fungera för fyto- och rhizodegradering bör enligt Pilon-Smits ha stora och täta rotsystem och höga halter av nedbrytande enzymer.

Fytostabilisering

Fytostabilisering innebär att växter används för att stabilisera föroreningar i jorden (Pilon-Smits 2005), genom att föroreningarna förändras i rhizosfären eller att markkemin eller mikrobiologin förändras där (Andersson och Svensson 2007). Genom fytostabilisering förhindras föroreningar från att föras vidare genom erosion, urlakning, avrinning eller genom att göra föroreningarna mindre växttillgängliga.

Andersson och Svensson skriver om att områden med förorenat gruvavfall, där metallerna inte kan brytas ner, är lämpliga för fytostabilisering för att ge växtlighet åt områdena och förhindra spridning av föroreningar.

Fytoavdunstning

Fytoavdunstning innebär att ämnen som lätt tas upp och transporteras genom växters vävnad avdunstar till luften genom transpiration (Andersson & Svensson 2007; Pilon-Smits 2005). Andersson och Svensson menar att en fördel med metoden är att giftiga ämnen kan omvandlas till en mindre giftig form, men att den också kan innebära att giftiga ämnen enbart förflyttas från mark till luften. Metoden har enligt Andersson och Svensson provats på kvicksilver och arsenik, utan att det hittats bevis för att den fungerar.

Hydraulisk kontroll

Vid hydraulisk kontroll förhindras föroreningar från att urlakas nedåt eller att spridas horisontellt, genom att träd tar upp förorenat grund-, mark- eller ytvatten genom rötterna och som sedan avdunstar (Andersson & Svensson 2007; Pilon-Smits 2005). Träd kan planteras antingen som en barriär mellan det förorenade området och exempelvis ett vattendrag som bör skyddas, eller direkt på den förorenade platsen (Andersson och Svensson 2007). Metoden fungerar för vattenlösliga föroreningar i icke fytotoxiska koncentrationer (Suthersan 2002 se Andersson och Svensson 2007).

Fytotäckning

Fytotäckning inkluderas av Andersson och Svensson (2007) som en fytoremedieringsmetod, där växtmaterial används för att täcka deponier. Genom växters transpiration minskas mängden vatten ner till det deponerade materialet och därmed minskas mängden förorenat lakvatten. Författarna skriver att i fytotäckning kan remedierande processer som rhizodegradering och fytostabilisering ingå, i de fall växternas rötter når ner till det deponerade materialet. Fytotäckning är idag inte tillåtet som enda täckningsmaterial i Sverige, utan måste användas ihop med konventionella täckningslager.

Tillämpning av fyto Remediering

Var och hur kan ovanstående metoder för fyto Remediering vara användbara? Vilka egenskaper bör de växter som används för metoden ha?

Fördelar och nackdelar

Sleegers (2010) beskriver fyto Remediering som ett processinriktat verktyg, där återtagandet av forna industrimark visualiseras genom den långsamma process som metoden innebär, och att dess värde kan ligga i den estetiska upplevelsen som ges under reningens gång. Sleegers menar att de förorenade ytor som är vanliga i industriella och postindustriella städer är värdefulla markresurser, men att de ofta är isolerade och skapar fysiska barriärer i det urbana landskapet och att fyto Remediering skulle kunna fylla en funktion i utvecklandet av grön infrastruktur.

Andersson och Svensson (2007) menar att de största fördelarna med fyto Remediering är de låga kostnaderna och lägre miljöpåverkan, i förhållande till konventionella metoder där föroreningar schaktas bort. En siffra på tio gånger lägre kostnad för fyto Remediering, jämfört med konventionella metoder, nämns (Schnoor 1997 se Peer et al. 2005). Pilon-Smits (2005) bekräftar att eftersom fyto Remediation sker på plats, i motsats till att föroreningarna schaktas bort, är det en kostnadseffektiv metod som också minskar risken att människor, djur och miljö utsätts för förorenade massor.

Fyto Remediering är optimalt att använda på stora förorenade områden med medelhöga eller låga koncentrationer av föroreningar (McCutcheon och Schnoor 2003 se Andersson och Svensson 2007). För områden med hög koncentration av föroreningar kan fyto Remediering kompletteras med konventionella metoder (Suthersan 2002 se Andersson och Svensson 2007). Pilon-Smits (2005) menar att en kombination av till exempel schaktning och fyto Remediering ofta är den mest kostnadseffektiva metoden, då utbredning och koncentration av föroreningar ofta är heterogent sammansatta.

Det långa tidsperspektivet som fyto Remediering innebär kan ses som en nackdel, då metoden inte lämpar sig för områden som måste saneras snabbt. Suthersan (2002) se Andersson och Svensson (2007) nämner också nackdelar som att växtmaterialet måste anpassas till klimatet på platsen vilket gör att erfarenheter inte kan tas direkt från projekt i andra länder, att växtsäsongerna är kortare i kallare klimat vilket ger längre reningsprocess, att reningen begränsas till växternas rot djup, att avfallet från fytoextraktion kan vara farligt och måste omhändertas rätt samt att föroreningar ackumulerade i växter kan vara skadliga för betande djur. Pilon-Smits skriver att en av fyto Remedieringens begränsningar är föroreningarnas biotillgänglighet. Om bara en liten del av ämnena i marken är i tillgänglig form för växter så fungerar inte metoden ensam för att sanera området.

Växter lämpliga för fyto Remediering

Pilon-Smits (2005) skriver att det viktigaste vid val av växter för fyto Remediering är att använda arter som normalt växer på eller nära det förorenade området, eftersom det betyder att de fungerar för förhållandena och kan tolerera de förekommande föroreningarna. Liksom upptaget av föroreningar varierar mellan olika växtsläkten kan det också variera mellan olika arter och kloner (Peer et al. 2005) och flera arter kan behöva samplanteras eller varieras från år till år, för att deras egenskaper ska komplettera varandra (Keller 2006 se Peer et al.).

Enligt Eichhorn, Evert & Raven (2005) är att hitta växter som tolererar höga halter av metaller ett ämne som behöver undersökas mer, för att hitta sätt att sanera förorenade områden efter till exempel industrier. Peer et al. (2005) skriver att indelningen av växter i toleranta, indikatorer och hyperackumulerare är användbar för att beskriva växter som kan leva på förorenad mark. Toleranta växter kan växa på mark som är toxisk för de flesta andra arter genom att hindra ämnen från att ta sig in i rotvävnaden och behöver inte vara varken indikatorer eller hyperackumulerare. Indikatorväxter har använts vid prospektering av metaller, där till exempel den i Sverige vanligt förekommande (Naturhistoriska riksmuseet 2008) örten backskärvfrö (*Thlaspi caerulescens*) sedan länge har visats sig växa på mark med höga halter zink (Peer et al. 2005).

När det gäller upptag av föroreningar i biomassan, det vill säga fytoextraktion, menar Eichhorn, Evert & Raven är hyperackumulerare de mest intressanta växterna för fyto Remediering, eftersom de kan samla en hög halt

metaller i sin biomassa. Pilon-Smits (2005) skriver motsatt att hyperackumulerare inte är passande för fytoremediering eftersom de generellt växer långsamt och bildar liten mängd biomassa. Peer et al. bekräftar motstridigheterna bland forskare mellan hög ackumulation men liten biomassa och lägre ackumulation men stor och lättskördad biomassa, men drar slutsatsen att mängden upptagna föroreningar per area borde vara det mest intressanta i sammanhanget.

För fytostabilisering, skriver Pilon-Smits (2005), passar en kombination av träd och gräs bäst, där till exempel poppel (*Populus sp.*) genom djupa rötter och snabb transpiration förhindrar läckage nedåt passar bra, medan gräs förhindrar erosion och avrinning genom sina täta rotsystem. För fytostimulering/rhizodegradering föreslår Pilon-Smits gräs med täta och djupa rotsystem såsom svingelsläktet (*Festuca sp.*), repensläktet (*Lolium sp.*) och hirssläktet (*Panicum sp.*). Poppel och pilsläktet (*Salix sp.*) är också lämpliga här, eftersom de har djupa rotsystem och dessutom är snabbväxande (Vangronsveld et al. 2009). Av samma anledningar är poppel och pil de mest använda träden för hydraulisk kontroll (Schnoor 2002 se Andersson & Svensson 2007). Poppel är enligt Pilon-Smits det mest använda trädet för fytoavdunstning, också på grund av dess snabba transpiration.

Fytoremediering av de metaller som finns i Falun

Andersson och Svensson (2007) har i sitt examensarbete gjort en enkätundersökning hos samtliga Sveriges länsstyrelser, där Länsstyrelsen Dalarna svarar att fytoremediering är en intressant metod som är möjlig att tillämpa på förorenade områden i länet, men att just området kring Falu gruva på grund av utnämningen till världsarv inte kommer att saneras. Vissa delar av området, beroende på kulturvärde och tillgänglighet skulle kunna vara aktuella för fytoremediering.

Fungerar fytoremediering som saneringsmetod för att avlägsna de metaller som finns i höga halter i Falun, på platser med liknande halter? Nedan nämns de växter som hittats vid litteraturstudien i samband med fytoremediering och de för Falun aktuella metallerna. Genomgången tar inte hänsyn till vilka växter som går att använda i Sverige och gör inte anspråk på att vara heltäckande för ämnesområdet. Många fler växter, som dessutom kan vara bättre lämpade för specifika förhållanden på platser i Sverige, finns säkert. Se tabell 3 för sammanställning av de växter som enligt litteraturstudien bekräftas ha eller möjligen har fytoremedierande egenskaper.

Arsenik

Pilon-Smits (2005) skriver att den hyperackumulerande ormbunksväxten *Pteris vittata* (svenskt namn ej funnits) visat lovande resultat i ta upp arsenik genom fytoextraktion. Peer bekräftar att växten fungerar i renande syfte, men menar att arsenik vid upptaget omvandlas till en form som är skadlig för djur och andra organismer som kommer i kontakt med växtdelarna.

Bly

Majs (*Zea mays*) och poppel verkar enligt en studie gjord av Komarek, Tlustos, Szakova, Chrastny & Ettler (2007) se Andersson och Svensson kunna extrahera bly från förorenade jordar. Majs var effektivare vid högre halt bly i jorden och ett pH kring 4, och poppel effektivare vid måttligt förorenade jordar med ett pH kring 6.

Enligt Peer et al. (2005) är flera växter kända för att kunna ackumulera bly i dess lösliga form och nämner ärtväxten *Sesbania drummondii* (svenskt namn ej funnits) samt flera arter ur kålsläktet (*Brassica sp.*). Kumar et al. (1995) har studerat hur kålsläktet (*Brassica sp.*) tar upp bly, och funnit att flera arter tar upp bly i rötterna men sareptasenap (*Brassica juncea*), svartsenap (*Brassica nigra*) och åkerkål (*Brassica campestris*) transporterar effektivt vidare ämnet till skotten. I försök med andra växter utöver kålsläktet visade solros (*Helianthus annuus*) och tobak (*Nicotiana tabacum*) bäst resultat i att ackumulera bly i både rot och skott. Enligt Dushenkov, Kumar, Motto och Raskin (1995) se Andersson och Svensson (2007) kan rödven (*Agrostis tenuis*) ackumulera höga halter av bly.

Kadmium

Peer et al. (2005) nämner backskärvför (*Thlaspi caerulescens*) i samband med kadmium, där växten i flera försök har visat sig ta bort den största delen av metallen, dock från en smal horisont och i långsam takt. I andra försök har höga halter koppar haft hämmande inverkan på tillväxten hos samma växt (Lombi, Zhao, Dunham & McGrath 2001 se Peer et al.) samt att dess ringa biomassa gör den mindre lämpad för fytoremediering. Även Vangronsveld et al. (2009) tar upp att backskärvför skulle kunna användas för fytoextraktion av kadmium.

Greger och Landberg (2015) skriver att salix, speciellt korgvide (*Salix viminalis*) har visat sig ackumulera höga halter av kadmium genom fytoextraktion och att den stora rotmassan är en fördel, då mer rötter ger mer yta som kan ta upp ämnet.

Koppar

Peer et al. (2005) skriver att de flesta koppartoleranta växter är exkluderare, det vill säga att de inte tar upp ämnet. Svartpil (*Salix nigra*) verkar till viss del kunna ackumulera koppar (Kuzovkina, Knee & Quigley 2004 se Peer et al.), men inga växter som säkert ackumulerar koppar har enligt Peer et al. hittats. Enligt UNEP (2016) är koppar ett av de ämnen som har störst potential att saneras med hjälp av fytoextraktion och att det finns cirka 400 växter som ackumulerar koppar.

Asensio, Covelo och Kandeler (2013) skriver att eukalyptus (*Eucalyptus sp.*) och tall (*Pinus sylvestris*) som planterats på tidigare obevuxen gruvmark har visat sig minska halten koppar i marken. Anledningen skulle kunna vara att aktiviteten kring trädens rötter har omvandlat koppar från orörlig till rörlig form, som sedan antingen lakats ur eller tagits upp av vegetationen.

Kvicksilver

Andersson och Svensson (2007) skriver att biotillgängligheten för kvicksilver är låg och att försök har gjort med att tillsätta kaliumjodid till marken för att öka kvicksilvrets rörlighet och därmed kunna använda fytoextraktion som metod för att ta upp metallen, men att det inte lyckats i någon större utsträckning. Däremot verkar pilsläktet (*Salix sp.*) kunna bidra till fytostabilisering av kvicksilver, genom dess stora rotsystem och omfattande transpiration (Wang & Greger 2004 se Andersson & Svensson 2007).

Peer et al. menar att inga växter som hyperackumulerar kvicksilver är kända. Salix tar upp ämnet i rötterna, men endast en mycket liten del förflyttas till skotten (Wang & Greger 2004 se Peer et al. 2005.). Peer et al. skriver vidare att försök görs med att omvandla kvicksilver i sin mest toxiska form till elementärt kvicksilver (Hg 0) som därmed skulle kunna renas genom fytoavdunstning. Att släppa ut det för människor toxiska kvicksilvret genom transpiration från växter är dock inte helt oproblematiskt, även om det sker i en form som är mycket mindre giftig än när ämnet är bundet i marken.

Mangan

Inga bekräftade uppgifter om växter som genom någon av fytoremedieringsprocesserna har effekt på mangan har hittats vid litteraturstudien. Däremot nämns växter ofta att i generaliserande termer kunna rena mark från metaller, varför det inte går att utesluta att dessa växter kan ta upp mangan.

Zink

Enligt UNEP (2016) är zink, liksom koppar, ett av de ämnen som har störst potential att saneras med hjälp av fytoextraktion och att det finns cirka 400 växter som ackumulerar ämnet. Liksom för kadmium har backskärvför (*Thlaspi caerulescens*), enligt Peer et al. (2005) visat sig vara en hyperackumulerare av zink, som dock i praktiken är mindre lämplig genom den lilla mängden biomassa och den långsamma reningstakten. Pilon-Smits (2005) nämner också att backskärvför är en hyperackumulerande växt och att försök pågår kring dess fytoremedierande processer.

Gallagher et al. (2008) har undersökt upptaget av metaller i poppelbjörk (*Betula populifolia*), virginiapoppel (*Populus deltoides*), *Rhus copallinum* (svenskt namn ej funnits) samt örten gråbo (*Artemisia vulgaris*) som vuxit på förorenade urbana områden (så kallade brownfields) och fann extremt höga halter av zink i bladmassan, i jämförelse med halterna i den omgivande marken, hos alla fyra arter. Detta skulle betyda att de undersökta arterna passar in i kategorin hyperackumulerare.

Gruvtrav (*Arabidopsis halleri*) är en annan växt som ska kunna ackumulera stora mängder zink i skotten (Zhao, Lombi, Breedon & McGrath 2000 se Peer et al.).

Tabell 3. Sammanställning av växter som bekräftas ha eller möjligen ha fytoremedierande egenskaper enligt litteraturstudien.

Ämne	Växt
Arsenik	<i>Pteris vittata</i>
Bly	Sareptasenap (<i>Brassica juncea</i>) Svartsenap (<i>Brassica nigra</i>) Åkerkål (<i>Brassica campestris</i>) Rödven (<i>Agrostis tenuis</i>) Solros (<i>Helianthus annuus</i>) Tobak (<i>Nicotiana tabacum</i>) <i>Sesbania drummondii</i> Majs (<i>Zea mays</i>)
Kadmium	Backskärvfrö (<i>Thlaspi caerulescens</i>) Korgvide (<i>Salix viminalis</i>)
Koppar	Svartpil (<i>Salix nigra</i>) Eucalyptus (<i>Eucalyptus sp.</i>) Tall (<i>Pinus sylvestris</i>)
Kviksilver	Eventuellt <i>Salix sp.</i>
Mangan	Inga uppgifter.
Zink	Backskärvfrö (<i>Thlaspi caerulescens</i>) Poppelbjörk (<i>Betula populifolia</i>) Virginiapoppel (<i>Populus deltoides</i>) <i>Rhus copallinum</i> Gråbo (<i>Artemisia vulgaris</i>) Gruvtrav (<i>Arabidopsis halleri</i>)

DISKUSSION

I det här arbetet har jag försökt att ta reda på om och hur de markförhållanden som den historiska gruvdriften i Falun har bidragit till påverkar vegetationen i tätorten. Om och hur växter kan rena mark, med utgångspunkt i de metallföroreningar som finns i Falun har också studerats. Syftet med arbetet är att ge en generell förståelse för ämnet och därför har jag inte gått på djupet i alla biologiska, kemiska och fysikaliska processer. Kopplingen till det som kan vara relevant för landskapsingenjörens arbetsområde har försökts hållas. I följande kapitel sammanfattas och diskuteras resultatet av litteraturstudien och avslutas med svar på de frågor som ställdes i inledningen.

MARKFÖRHÅLLANDEN I FALUN

Falu koppargruva har tusenåriga anor och dess storhetstid inföll under 1600-talet, då gruvan var en av världens största kopparproducenter och av stor betydelse för Sveriges ekonomi. Den malm som brutits är av typen sulfidmalm, som lätt vittrar och frigör tungmetaller. Gruvan stängdes 1992 men är fortfarande viktig för stadens identitet, bland annat genom den utnämning som 2002 gjorde gruvan och omgivande lämningar till världsarv. Utnämningen innebär att gruvan och de högar av restprodukter såsom slagg och varp som omger den ska bevaras för all framtid. Som boende eller besökande i Falun är det också svårt att undvika spåren efter gruvan, då de stora högarna av restprodukter ligger synliga i tätorten.

På 1600-talet var Falun enligt dåtida besökare, såsom Carl von Linné, kargt och svavelosande. De utsläpp av tungmetaller och svavel till luft, vattendrag, grundvattenflöden och mark som den historiska gruvdriften gett upphov till har genom åren blivit föremål för utredningar och projekt, i syfte att minska utsläppen. För att kunna studera hur markföroreningarna kan påverka vegetation har ett underlagsmaterial från utförda undersökningar varit nödvändigt att ha. Gällande förekomst av metaller har jag utgått från en undersökning från 1991, gjord av Miljö- och hälsoskydd, Falu kommun. Proverna i undersökningen är tagna i tallskog, från humusskiktet och mineraljordens övre skikt. Jag valde att utgå från den undersökningen eftersom den fanns tillgänglig och för att resultatet är tydligt sammanställt i rapporten *Markens metallinnehåll i Falu tätort med omgivning* (Sandberg 1995). Jordproverna från 1991 kan antas vara gällande fortfarande, eftersom markens buffringssystem ser till att kompensera för växternas upptag av metaller från jorden genom att nya metalljoner kommer ut i markvätskan.

Naturvårdsverket har satt upp generella riktlinjer för förorenad mark. Riktlinjerna anger högsta acceptabla halt av tungmetaller i mark och ska fungera som ett redskap vid val av efterbehandlingsmetod (till exempel täckning eller schaktning) av förorenad mark, i syfte att skydda människor, markmiljö, ytvatten och grundvatten. Rörande markmiljön handlar det om att den bör skyddas så att de ekosystemfunktioner som behövs för den planerade markanvändningen långsiktigt upprätthålls. Jag har jämfört halterna av de tungmetaller som uppmättes i Falun 1991 med Naturvårdsverkets riktlinjer för känslig markanvändning och mindre känslig markanvändning och har funnit att arsenik, bly, kadmium, koppar, kvicksilver och zink finns i höga halter. Även mangan finns i höga halter, men tas ej upp i Naturvårdsverkets riktlinjer.

Svavel i form av svaveldioxid har historiskt släppts ut i luften genom upphettning av malm och vid den svavelsyratillverkning som var en etablerad kringindustri till gruvan. De ackumulerade svavelutsläppen från 1200-talet till 1993 sägs vid en beräkning vara 64 kg svaveldioxid/m² mark inom en radie av en kilometer från gruvan.

De undersökningar av markens pH-värde som ingår i underlaget till det här arbetet är gjorda mellan åren 1973 och 1994. Undersökningarna visar att pH i humusskiktet ligger under 4 i stort sett hela det undersökta området. pH 4 är normalt för skogsmark, men på en del lokaler, både i tätort och i skogsmark, är pH ända ner till 2,8. I mineraljorden varierar pH-värdet från 3,2 i den övre delen av skiktet till 6 längre ner. pH på drygt 5 är normalt för skogsmark. Den uppmätta försurningen antas vara orsakad av ett långvarigt utsläpp av försurande svaveldioxid.

VEGETATIONSPÅVERKAN

Växters upptag av olika ämnen är ett komplext ämne med många olika faktorer inblandade, till exempel mängd rotyta, i vilken form ämnet finns i marken och förekomst av mykorrhiza. I litteraturstudien har information om vad som påverkar upptaget av var och en av de metaller som finns i förhöjda halter i Falun och om metallerna är fytotoxiska sökts. Sökningar på ord relaterade till ämnet har gett en mängd träffar, främst på vetenskapliga artiklar, som har innehållit relevant och intressant information men få svar på konkreta fytotoxiska symptom. De symptom som funnits beskrivna har varit utifrån de specifika undersökningar som artiklarna och texterna handlat om, och ofta på växter som inte alltid är relevanta för sammanhanget i Falun. Mängden litteratur som finns i ämnet och det ringa urval som gjorts i det här arbetet betyder att jag inte kan göra anspråk på att ge en heltäckande bild av ämnet fytotoxisk påverkan av metaller i mark på detaljnivå. Däremot har en rad samband återkommit i den litteratur som lästs, vilket gör att generella slutsatser om samband mellan markförhållanden såsom pH och upptag i växter kan dras.

De konkreta fytotoxiska effekter av höga halter av arsenik, bly, koppar, mangan och zink, som jag har hittat omnämnda handlar i stort sett om hämmad tillväxt och dålig utveckling av rötter, stam och bladmassa, kloros i unga blad och nekros i äldre blad samt pigmentförändringar såsom ökad produktion av pigmentet antocyanin (som ger en rödlila färg). Arsenikförgiftning verkar ovanligt, trots höga halter i mark. Vad gäller bly så är halterna i Faluns mark höga, men finns i mineraljorden i en form som är svårtillgänglig för växter och det bly som tas upp stannar till största delen i rötterna. För kadmium och kvicksilver har inga uppgifter hittats. Upptaget av alla metaller verkar gynnas av lågt pH, det vill säga metallerna blir mer växttillgängliga vid sura markförhållanden. Kvicksilver är undantaget, där upptaget snarare ökar vid en hög halt av ämnet i marken.

Markens näringsstatus har starka samband med föroreningshalten. I det mest förorenade området i Falun är nedbrytningen av förna i tallskog starkt hämmad, vilket fått följeffekten att en liten mängd ny humus bildas. Utöver tallen finns det mycket lite av annan vegetation som vanligtvis hör hemma där, såsom mossor, lavar och lingon, vilket antas bero på de höga metallhalter i marken. Mängden växttillgänglig fosfor är låg inom samma område. I området är även halten mangan i marken låg, vilket kan ha ett samband med att bly, kvicksilver och arsenik finns i mycket höga halter. Låg tillgång på mangan försämrar förhållandena för många nedbrytande svampar. Den dåliga nedbrytningen av organiskt material och därmed minskad mängd humus att binda fosfor till, kan bidra till den minskade fosforhalten. Minskad fosfortillgång kan ge rödlila bladmassa (ökat antocyanin), hämmad stamtillväxt och nekros i äldre blad. Vid lågt pH löses också aluminium ut i markvätskan, vilket även det hämmar upptaget av nödvändiga näringsämnen. Aluminium kan förutom näringsbrist leda till fytotoxiska symptom som hämmad rottillväxt.

Att marken i Falun generellt är försurad i både humusskikt och mineraljord skulle enligt vad litteraturstudien visar göra att upptaget av de flesta metaller är högt i biomassan på de växter som är icke-exkluderare (det vill säga indikatorväxter och hyperackumulerare) och i rötterna i de exkluderare som lagrar metaller där. Hämmad tillväxt, kloros och nekros torde alltså gå att finna hos vissa växter. I flera av de undersökningar som nämns i litteraturstudien visar växterna, främst löv- och barrträd, inga symptom på förgiftning trots att de vuxit i metallförorenad jord. I fallet med zink och tall, verkar tall som har vuxit ihop med mykorrhiza vara frisk. För att säga om förekomsten av mykorrhiza är låg i de förorenade områdena i Falun, där den låga manganhalten påverkar markens mikrobiologi, behövs mer källmaterial, men en fundering jag gör är om det finns ett samband där. Enligt litteraturen verkar tallen i det aktuella området dock vara frisk.

Vid egna iakttagelser i området Galgberget tycker jag mig urskilja två typer av tallskog. Den ena typen består nästan helt av tall och med mycket lite undervegetation (se figur 6). Marken där är stenig och torr och täckt av barr som inte brutits ner. Lagret av förna är ett par centimeter tjockt. Tallen varierar i höjd mellan olika områden med denna typ av fattiga skog. På ett område är den låg, kanske 10-15 meter hög och ser relativt gammal ut, medan den alldeles bredvid i den rikare typen av skog är högre. I denna rikare tallskog finns inslag av björk och undervegetationen är frodigare med blåbärsris, ljung och björksly (se figur 7).

I samband med koppar nämns kloros, nekros och hämmad tillväxt hos poppelsläktet. Eftersom poppel och asp är vanliga som parkträd och till viss del finns i skogsmark i Falun vore det intressant att undersöka närmare om de träden har nämnda symptom.

Eftersom näringsupptaget generellt är känsligt för förändringar i pH är det rimligt att anta att näringsbrist är det störst hotet mot vegetation som växer på försurad mark. Lågt pH gör också att upptaget av de flesta metaller ökar och med dålig näringsstatus skulle vegetationen kunna vara mer sårbar för fytotoxiska effekter. För att förbättra näringstillgången och minska upptaget av metaller kan jordförbättrande metoder användas. I sur skogsmark har kalkning visat sig öka nedbrytningen av förna och nybildandet av humus och därmed öka näringstillgången för tall. Kalkning kan också kombineras med tillförsel av organiskt material och rötslam, i jordförbättrande syfte.



Figur 6. Tallskog på Galgberget 2016. Avsaknad av undervegetation och låg nedbrytning av förna. Foto Stina Jansson, maj 2016.



Figur 7. Tallskog med rikare undervegetation på Galgberget. Foto Stina Jansson, maj 2016.

FYTOREMEDIERING – ATT RENA MARK MED VÄXTER

Att använda vissa växters förmåga att ta upp, omvandla, stabilisera, avdunsta eller förhindra markföroreningar från att spridas kallas fyto Remediering och är en metod som ännu inte används i större utsträckning i Sverige, men som skulle kunna vara ett alternativ till konventionella metoder för att åtgärda en del av den stora mängd förorenade områden som finns efter till exempel industrier.

Eftersom fyto Remediering är en långsam process behöver den betraktas med ett helt annat tidsperspektiv än vid till exempel bortschaktning av förorenade massor, men i gengäld är det mycket mer kostnadseffektivt att ta hand om föroreningarna på plats med hjälp av växtmaterial. Metoden verkar lämpa sig bäst för låga eller medelhöga föroreningshalter och kan kombineras med andra saneringsmetoder. Fyto Remediering är inte möjligt att använda på de områden i Falun som ingår i världsarvet genom dess skyddade kulturhistoriska värde, men skulle kunna vara en möjlighet på andra platser. Jag har valt att ha med kapitlet om fyto Remediering eftersom det är en intressant och relevant följdfråga till ämnet om markföroreningars skadliga påverkan på vegetation – eftersom vissa växter tar upp metaller, kan de då utnyttjas till att rena marken från samma ämnen?

Kapitlet om fyto Remediering utgår från samma metaller som studien av fytotoxiska effekter. Litteratursökningen har också här gett en mängd träffar och mycket information om de processer som är involverade i fyto Remediering, men färre uppgifter om specifika växter som kan användas och speciellt växter anpassade till nordliga förhållanden. Jag har dock valt att nämna de växter som hittats, för att ge en övergripande bild av vad fyto Remediering är. I planeringen av konkreta projekt behövs självklart en fördjupande studie utifrån platsens förutsättningar.

För all fyto Remediering är det en fördel att välja växter som finns på eller nära platsen, eftersom det betyder att de tolererar förhållandena på platsen. Fytoextraktion, som är den mest omskrivna processen i den litteratur som lästs för det här arbetet, innebär att växten tar upp ämnen i rötter, skott och/eller blad. Biomassan måste sedan skördas för att föroreningarna ska föras bort från platsen. Att använda det skördade materialet för energiutvinning kan vara ett användningsområde. Indikatorväxter och hyperackumulerare är de typer av växter som är mest intressanta för ändamålet, eftersom de tar upp ämnen i sina ovanjordiska delar. Ett högt upptag av föroreningar per area liksom att växterna är lättskördade är viktiga parametrar vid val av växter för fytoextraktion.

Växter som förutom att vara snabbväxande har täta och djupa rotsystem är lämpliga för metoderna fytostabilisering, där föroreningarna stannar kvar i jorden men förhindras att föras vidare liksom vid fytostimulering och rhizodegradering, där föroreningarna bryts ned i växten eller i rotzonen. Olika gräs, pil och poppel är lämpliga för detta. Pil och poppel kan också användas för hydraulisk kontroll, där föroreningar hindras från att spridas via vatten i marken, och vid fytoavdunstning, där föroreningar förs bort genom växters transpiration.

Uppgifter om växter som genom fyto Remediering kan rena mark från arsenik, bly, kadmium, koppar och zink har hittats vid litteraturstudien. För arsenik har endast ormbunksväxten *Pteris vittata* stötts på, men inget svenskt namn för växten har hittats och inte heller uppgifter om dess hårdighet. Pilsläktet kan eventuellt fungera för kvicksilver och för mangan hittades inga uppgifter. En återkommande växt i litteraturen är den i Sverige vanliga örten backskärvfrö (*Thlaspi caerulescens*), som ska kunna hyperackumulera kadmium och zink. För bly nämns också några i Sverige inhemska växter - flera arter i kålsläktet, rödven och solros. Tall nämns i samband med koppar, och om det stämmer vore det intressant att titta närmare på om halterna koppar är lägre på de platser i Falun där det växer tall. Zink ska förutom av backskärvfrö kunna fyto Remedieras av bland annat gråbo, gruvtrav, virginiapoppel och poppelbjörk.

Att växters fysiologiska processer kan ta upp eller på andra sätt påverka markföroreningar och att detta i viss mån kan användas för att rena mark är enligt litteraturstudien belagt. Jag har dock stött på många motstridiga uppgifter om hur effektiv metoden är. I en del fall har motstridiga uppgifter från olika undersökningar, där samma art använts i mark med samma typ av föroreningar, stötts på. Detta skulle kunna betyda att det dragits felaktiga slutsatser av undersökningar, eller att många olika faktorer gällande specifika markförhållanden och förutsättningar på olika platser spelar roll för hur effektivt reningsprocesserna fungerar, liksom att det förekommer skillnader på individnivå mellan växter, till exempel beroende på hur och var de är förökade.

Som tidigare nämnts måste det urval av växter som presenteras i det här arbetet ses för vad det är – ett urval utifrån den litteratur som det här arbetet bygger på. Fler släkten och arter finns säkert, och kommer säkert att hittas, eftersom fytoremediering verkar vara ett ämne där forskning pågår.

REFLEKTIONER KRING TILLÄMPNING AV RESULTATET AV LITTERATURSTUDIEN UR ETT FALUPERSPEKTIV

I delar av Falun är marken försurad och innehåller höga halter av metallerna arsenik, bly, kadmium, koppar, kvicksilver, mangan och zink, som generellt blir mer växttillgängliga vid låga pH-värden, vilket kan leda till fytotoxiska effekter. Försurning i kombination med föroreningar leder till dålig nedbrytning av förna åtminstone i tallskog, vilket i sin tur leder till näringsbrist. Att aluminium löses ut i markvätskan vid lågt pH leder även det till näringsbrist. Att höja pH-värdet för att öka näringstillgången kan vara viktigt i sammanhanget, om någon åtgärd behöver vidtas. Att tillföra kalk, eventuellt tillsammans med organiskt material, kan höja pH i mark. Jag har i det här arbetet inte fördjupat mig i vilka mängder av kalk som behöver tillföras för att höja pH till en viss nivå. Det vore intressant att se försök med kalkning gjorda vid förhållanden motsvarande de i Falun och att utifrån detta dra slutsatser om vad som krävs för att höja pH-värdet.

Att vara medveten om de beskrivna sambanden och dess konsekvenser för vegetationen är värdefull kunskap vid anläggande av parkmark i Falun, i större eller mindre utsträckning beroende på platsens funktion. De av Naturvårdsverket uppställda generella riktvärdena för föroreningar i mark tar hänsyn till både markmiljö och människors hälsa vid både känslig och mindre känslig markanvändning. Föroreningars påverkan på människors hälsa måste i praktiken väga tyngre än eventuella toxiska symptom på växter, varför riktvärdena inte får överskridas på områden där människor vistas regelbundet. När både matjord och mineraljord schaktas bort vid nybyggnation tas föroreningarna bort därifrån (förutsatt att jorden inte återanvänds). Inom sådana nybyggnadsområden måste det därför vara viktigast att skapa så optimala växtförhållanden som möjligt, utan att ta speciell hänsyn till föroreningar.

Vid plantering i befintlig mark kan det däremot vara aktuellt att höja pH-värdet och att välja växter som tolererar de föroreningar som finns. Vid större anläggningar i befintlig mark kan det vara en god idé att ta nya jordprover för att vara säkra på markens status vad gäller näringstillgång, metaller och pH. I Falun är pH i humusskiktet på många platser under 4, vilket är för surt även för de flesta surjordsväxter. Att göra större parkanläggningar med planterade kulturväxter på dessa platser är kanske helt enkelt något som bör undvikas. Om det ändå behöver göras kan det bästa vara att byta ut matjordslagret och eventuellt en del av mineraljorden.

Vid nybyggnation av till exempel bostadsområden där inte all mark schaktas bort utan befintlig mark bitvis sparas för att ingå i områdets utformning, kan det tänkas vara viktigt att utifrån vad provtagningen visar höja pH-värdet i den befintliga marken för att minska upptaget av föroreningar i växter. Här krävs medvetenhet om föroreningarnas risker för både människor och markmiljö genom hela planprocessen, för att vidta de åtgärder som är möjliga.

Hur kan fytoremediering sättas i samband med markföroreningarna i Falun? Att använda metoden på områden som är skyddade för dess industrihistoriska värde är som redan konstaterat inte aktuellt. Föroreningarna som kan härledas till gruvdriften och dess kringindustrier är dock inte begränsade enbart till dessa platser, utan finns spridda över ett större område. Fytoremediering är fördelaktigt både ur ett miljö- och kostnadsperspektiv, men också dess funktion i gestaltning är intressant. Att använda fytoremediering kräver ett längre tidsperspektiv än vid konventionella saneringsmetoder, eftersom växterna måste växa och sköras och eventuellt omplanteras många år i följd, och är därför inte användbar på alla förorenade områden. I en tätort där marken behövs för nybyggnation inom några år är metoden kanske mindre lämplig.

I en kommun där det läggs stor vikt vid det kulturhistoriskt värdefulla industriella arvet tycker jag det skulle vara intressant att lyfta fram processerna och tiden som krävs för att föra bort de historiska föroreningarna från mark som i framtiden ska exploateras. Vid långsiktiga exploateringsplaner, för såväl byggnader som park- och

rekreationsmark, tänker jag att fyto Remediering skulle kunna vara en del av en gestaltning som pågår och omformas och där platsen kan besökas under reningsprocessens gång. Att använda fyto Remediering i kombination med odling av biomassa för energiutvinning är också det en intressant tillämpning av växternas egna fysiologiska processer för att ta upp markföroreningar och som har framtidspotential.

Det vore roligt att se forskning om fyto Remediering utifrån den starkt förorenade och sura marken i Falun. Jag tänker att det finns platser i staden där markförhållandena kan vara lämpliga som provytor för att studera specifika växters/växtkombinationers reningsförmågor. Speciellt de inhemska växter som nämnts i litteraturstudien, såsom pil-, poppel- och kåsläkterna (och säkerligen finns det fler släkten/arter att undersöka) vore intressanta att se i konkreta försök i Falun. Ytterligare forskning och försök i Sverige, både om vegetationspåverkan, jordförbättring och fyto Remediering, tror jag är viktigt för att kunna använda idag förorenade områden för framtida exploatering, liksom för att förbättra markmiljön på platser som redan är bevuxna.

Slutsatser

- Är metaller i höga halter fytotoxiska?

Litteraturstudien kring metallerna arsenik, bly, kadmium, koppar, kvicksilver mangan och zink visar att fytotoxiska symptom såsom hämmad tillväxt, kloros, nekros och missfärgningar kan förekomma hos vissa växter vid höga halter av vissa av metallerna. För att dra säkrare slutsatser kring metallers direkt fytotoxiska påverkan behövs ett större litteraturunderlag.

- Är befintlig mark i förorenade områden i Falun användbar för plantering?

I situationer där plantering i befintlig jord är lämpligt bör (i alla fall vid större och kostsamma anläggningar) nya jordprover tas för att få aktuella uppgifter om markens näringsstatus, pH och metallinnehåll. Vid lågt pH, högt metallinnehåll och låg näringstillgång kan det antas att upptaget av metaller i växter är högt, vilket kan leda till fytotoxiska symptom och näringsbrist om inget förändras i marken. Att tillföra kalk, eventuellt i kombination med organiskt material, är ett sätt att höja pH-värdet och därmed hämma upptaget av metaller och höja näringstillgången. Detta bör göras för att ge växterna bästa möjliga förutsättningar att må bra och uppfylla funktionen med planteringen.

- Kan växter användas för att rena mark från metaller?

Att utnyttja växters egna fysiologiska processer för att rena mark, så kallad fyto Remediering, är en metod som enligt litteraturstudien fungerar. Olika undersökningar visar dock olika resultat i fråga om metodens effektivitet. Genom att använda växtmaterial som behöver växa, skördas och eventuellt nyplanteras är metoden långsammare än konventionella reningsmetoder, men också billigare, vilket ger metoden både för och nackdelar. Alla växter är inte lika lämpliga för fyto Remediering, varför resultatet av metoden är avhängigt rätt växt på rätt plats och eventuellt rätt kombinationer av olika växter. Att prova fyto Remediering på förorenade platser i Falun vore intressant både ur forskningssynpunkt och som ett led i en långsiktig exploateringsplan där fyto Remediering ingår som ett gestaltungsmedel.

- Alagic, S. C., Serbula, S. S., Tosic, S. B., Pavlovic, A. N. och Petrovic, J. V. (2013). Bioaccumulation of Arsenic and Cadmium in Birch and Lime from the Bor Region. *Arch Environ Contam Toxicol*, 65, ss. 671-682.
- Alloway, B. J. Dr. (red.) (1990). *Heavy Metals in Soils*. Blackie and Son Ltd.
- Andersson, Å och Svensson, M. (2007). *Fytoremediering – Att rena mark och vatten med växter*. Examensarbete, Ekologiska Institutionen. Lund: Lunds universitet.
- Asensio, V, Covelo, E. F. & Kandeler, E. (2013). Soil management of copper mine tailing soils – Sludge amendment and tree vegetation could improve soil quality. *Science of the Total Environment*, 2013(456-457), ss. 82-90.
- Asensio, V., Vega, F. A., Singh, B. R. och Covelo, E. F. (2012). Effects of tree vegetation and waste amendments on the fractionation of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in polluted mine soils. *Science of the Total Environment*, 2013(443), ss. 446-453.
- Ashman, M. R. & Puri, G. (2002). *Essential Soil Science: a clear and concise introduction to soil science*. Blackwell Publishing.
- Bergholm, J., Löfgren, S. & Qvarfort, U. (1998). *Faluns historiska svavelbelastning. Tre rapporter om svavel och pH i Faluområdet*. Falu kommun, Miljö- och hälsoskydd.
- Chatzistathis, T., Alifragis, D. och Papaioannou, A. (2014). The influence of liming on soil copper properties on the alleviation of manganese and copper toxicity in Juglans regia, Robinia pseudoacacia, Eucalyptus sp. and Populus sp. plantations. *Journal of Environmental Management*, 2015(150), ss. 149-156.
- Christiansson, Å., Elert, M. & Jones, C. (1998). *Metaller i mark i Falu tätort. Fördjupad miljö- och hälsoriskbedömning*. (Rapport MH 1998:4). Falu kommun, Miljö- och hälsoskydd.
- Dunér, D. (2009). *Helvetet i Falun*. Populär Historia 2009(3).
<http://www.popularhistoria.se/artiklar/helvetet-i-falun/> [2016-04-28]
- Eichhorn, S. E., Evert, R. F. & Raven, P. H. (2005). *Biology of Plants*. 7 uppl., New York: W. H. Freeman and Company Publishers.
- Ek, A. S., Löfgren, S., Bergholm, J. & Qvarfort, U. (2001). Environmental Effects of One Years of Copper Production at Falun, Central Sweden. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 30(2), ss. 96-103.
- Falu kommun. (2015). *Råd och riktlinjer för att minska hälsoriskerna*.
<http://www.falun.se/bygga-bo--miljo/metaller-i-mark-och-vatten/rad-och-riktlinjer.html> [2016-04-14]
- Gallagher, F. J., Pechmann, I., Bogen, J. D., Graborsky, J. och Weis, P. (2008). Soil metal concentrations and vegetative assemblage structure in an urban brownfield. *Environmental Pollution*, 153, ss. 351-361.
- Greger, M. och Landberg, T. (2015) Novel Field Data on Phytoextraction: Pre-Cultivation With Salix Reduces Cadmium in Wheat Grains. *International Journal of Phytoremediation*, 17:10, ss. 917-924. <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2014.1003785>
- Ivanov, Y. V., Savochkin, Y. V. och Kuznetsov Timiryazev, V. V. (2011). Scots Pine as a Model Plant for Studying the Mechanisms of Conifers Adaptation to Heavy Metal Action: 1. Effects of Continuous Zinc Presence on Morphometric and Physiological Characteristics of Developing Pine Seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011(5), ss. 728-236.
- Hanaeus, Å. (2010). *Åtgärder på gruvområdet vid Falu gruva*. (Rapport 6402). Stockholm: Naturvårdsverket.
<http://www.naturvardsverket.se/Om-Naturvardsverket/Publikationer/ISBN/6400/978-91-620-6402-0/>
- Haglund, P. & Hanaeus, Å. (2010). *Historisk bakgrund och genomförandet av Faluprojektet*. (Rapport 6399). Stockholm: Naturvårdsverket. <http://www.naturvardsverket.se/Om-Naturvardsverket/Publikationer/ISBN/6300/978-91-620-6399-3/>
- Johnsson, L. (1995). *Tungmetaller i träd och energigrödor – en litteraturstudie*. (Rapport 1995:5). Vattenfall Utveckling AB.
- Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H och Raskin, I. (1995) Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology*, 1995(29), ss. 1232-1238.
- Lepp, N. W. (1995). Uptake, mobility and loci of concentration of heavy metals in trees. I Glimmersven, I. *Heavy Metals and Trees*. (1996). Edinburgh: Institute of Chartered Foresters, ss. 68-84.
- Naturhistoriska riksmuseet. 2008. *Den virtuella floran. Backskärfrö, Thlaspi caerulescens J. Presl & C. Presl*.
<http://linnaeus.nrm.se/flora/di/brassica/thlas/thlaca.html> [2016-05-15]

- Naturvårdsverket. (2006). *Förorenade områden och fysisk planering*. (Rapport 5608). Stockholm: Naturvårdsverket.
<http://www.naturvardsverket.se/Om-Naturvardsverket/Publikationer/ISBN/5600/91-620-5608-5/>
- Naturvårdsverket. (2009). *Riktvärden för förorenad mark*. (Rapport 5976). Stockholm: Naturvårdsverket.
<http://www.naturvardsverket.se/Om-Naturvardsverket/Publikationer/ISBN/5900/978-91-620-5976-7/>
- Naturvårdsverket. (2015). *Förurning*. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Mark/Forurning/#> [2016-04-28]
- NE (2016). *Malm*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/svavel> [2016-04-26]
- NE (2016). *pH*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/ph> [2016-04-26]
- NE (2016). *Svavel*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/svavel> [2016-04-26]
- Nordlander, C. (2004). *Inventering av förorenade områden i Dalarnas län. Industriområden vid Runns norra strand*. (Rapport 2004:20). Länsstyrelsen Dalarna, Miljövårdsenheten.
<http://www.lansstyrelsen.se/dalarna/SiteCollectionDocuments/Sv/Publikationer/Rapporter-2004/04-20.pdf>
- MarkInfo (2007). *PH*. <http://www-markinfo.slu.se/sve/kem/cnph/ph.html> [2016-04-14]
- Peer, W. A., Baxter, I. R., Richards, E. L., Freeman, J. L. och Murphy, A. S. (2005). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. *Topics in current genetics*. (August 2005). <https://www.researchgate.net/publication/225421418>
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 2005(56), ss.15-39.
<http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214> [2016-04-29]
- Raskin, I., Kumar P. B. A. N., Dushenkov, S. & Salt, D E. (1994). Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology*, (5), ss. 285-290.
- Ross, S. M. (1995). Summary of conference on heavy metals and trees. I Glimmersven, I. *Heavy Metals and Trees*. (1996). Edinburgh: Institute of Chartered Foresters, ss. 68-84.
- Rydberg, S. (1979). *1000 år vid Stora Kopparberget*. Stockholm: Gullers International AB.
- Sandberg, P-E. (1995). *Markens metallinnehåll i Falu tätort med omgivning. Redovisning av markundersökningar 1973-1993*. Falu kommun, Miljö- och hälsoskydd.
- Sandberg, P-E. (1996). *Tisken. Lägesrapport december 1996*. Falu kommun, Miljö- och hälsoskydd.
- Sundström, K. (2002). *Falu gruva och tillhörande industrier – industrihistorisk kartläggning med avseende på förorenad mark*. (Rapport 2002:12). Länsstyrelsen Dalarna, Miljövårdsenheten.
<http://www.lansstyrelsen.se/dalarna/SiteCollectionDocuments/Sv/Publikationer/Rapporter-2002/02-12.pdf>
- Tichelen, K. K. Van, Colpaert, J. V. och Vangronsveld, J. (2000). Ectomycorrhizal protection of *Pinus sylvestris* against copper toxicity. *New Phytologist*, 2001(150), ss. 203-213.
- United Nations Environment Programme, UNEP. *Phytoremediation: An Environmentally Sound Technology for Pollution Prevention, Control and Remediation*. <http://www.unep.or.jp/etec/Publications/Freshwater/FMS2/2.asp>. [2016-05-06]
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., Lelie, D. van der. och Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ Sci Pollut Res*, 2009(16), ss. 765–794.